

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

СПИРИДОНОВ ДМИТРО ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 621.74.047:669.3

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ
НАПІВБЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ МІДІ
ВОГНЕВОГО РАФІНУВАННЯ**

Спеціальність 05.16.02 Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних
сплавів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Донецьк – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Донецький національний технічний університет» (м. Донецьк) Міністерства освіти і науки 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
ЧЕРВОНІЙ Іван Федорович,
Запорізька державна інженерна академія (м. Запоріжжя),
завідувач кафедри «Металургія кольорових металів»;

кандидат технічних наук, доцент
СЕМІРЯГІН Сергій Володимирович,
Донбаський державний технічний університет
(м. Алчевськ), проректор з наукової роботи, доцент
кафедри «Металургія чорних металів».

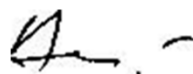
Захист відбудеться «___» _____ 2014 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д11.052.01 Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, I навчальний корпус, ауд. 1.203.

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 «___» _____ 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Д 11.052.01, д.т.н., проф.



О.В. Яковченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В умовах відсутності в Україні джерел рудної сировини для виробництва міді електролітичного рафінування, на ПАТ «Артемівський завод з обробки кольорових металів» (ПАТ «АЗОКМ») впроваджена іспанська технологія одержання міді з лому шляхом вогневого рафінування у газовій відбивній печі. З огляду на те, що вітчизняний лом має у декілька разів більше домішок, ніж європейський, технологія рафінування та розливки такої міді потребує доопрацювання, а отримана таким шляхом мідь потребує уточнення специфічних відмінностей у фізико-механічних властивостях від міді електролітичного рафінування, що використовувалась раніше. Подібні дослідження є актуальними тому, що собівартість міді вогневого рафінування є значно меншою, і перехід на використання такої міді в масштабах країни матиме суттєвий економічний ефект.

З огляду на невеликі об'єми виробництва в промисловій практиці розливання міді та її сплавів найбільше розповсюдження отримав метод напівбезперервного лиття. В цьому випадку швидкості розливання незначні і твердіння скінчається у межах кристалізатора, внаслідок чого значний вплив на умови кристалізації та якість зливків, що розливаються, має швидкість та напрямок потоків рідкої міді. Тому вивчення процесів тепло- та масообміну в кристалізаторі сприяє подальшому вдосконаленню технології отримання якісного металу та зниженню його собівартості.

Єдиною механічною частиною машини напівбезперервного лиття заготовки (МНБЛЗ), яка безпосередньо контактує з затвердіваючим зливком, є кристалізатор. Рівень організації процесів теплообміну в ньому обумовлює якість отриманої міді та швидкість розливання, отже собівартість продукції. Підвищення ефективності процесу досягається за рахунок збільшення теплових потоків, що, в свою чергу, сприяє зростанню термічних напружень, які призводять до деформації, зниження стійкості кристалізаторів та до збільшення кількості дефектів зливка.

У зв'язку з вищезначеним, актуальним є розвиток теорії напівбезперервного розливання міді вогневого рафінування, що направлене на покращення умов формування заготовок, шляхом вибору раціональної конфігурації внутрішньої порожнини кристалізатора.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація відповідає основним напрямкам Комплексної програми розвитку кольорової металургії України (постанова Кабінету Міністрів України від 18 жовтня 1999 р. №1917), Державній програмі розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу на період до 2011 р. (постанова Кабінету Міністрів України від 28 червня 2004 р. № 967), Державній програмі науково-технічного розвитку Донецької області на період до 2020 року (постанова обласної Ради 3/25-656 від 22.03.2002 р.) та Державній програмі енергозбереження. Частина досліджень виконана в межах хоздоговірної роботи «Аналіз та розробка раціональних технічних рішень для розливання якісної заготовки з рафінованої міді та її сплавів» ПАТ «АЗОКМ» з ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», в якій здобувач брав участь в якості відповідального виконавця, а також у межах госпдоговірної роботи «Аналіз умов формування та розробки раціональних технічних рі-

шень для отримання якісної продукції при розливанні на колесо рафінованої міді» ПАТ «АЗОКМ» з ВАТ «Технопарк ДонНТУ УНІТЕХ», в якій здобувач брав участь в якості виконавця.

Мета і завдання дослідження. Робота спрямована на розвиток теорії та технології процесу розливання міді вогневого рафінування в кристалізатор з мідними теплопровідними стінками з метою покращення якості зливків, що відливаються, шляхом вибору раціональної конфігурації внутрішньої порожнини кристалізатора та забезпечення раціональних гідродинамічних потоків в лунці рідкої міді.

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

- вивчити основні фізико-механічні властивості міді вогневого рафінування, порівняти їх з відомими властивостями міді електролітичного рафінування, на підставі чого надати висновок про можливість адекватної заміни;

- виробити вимоги до заключного етапу процесу рафінування, що забезпечують мінімальні витрати при збереженні необхідного рівня якості готової продукції;

- дослідити теплофізичні умови твердіння і формування мідних зливків в мідному кристалізаторі і гідродинамічні потоки в рідкій лунці, вивчити процеси формування тріщин в мідних заготовках, що розливаються на МНБЛЗ;

- вивчити характер взаємодії рідкої міді з різними покриттями і на основі отриманих даних виконати аналіз перспектив використання таких покриттів для вирішення завдання підвищення якості зливків;

- розробити для умов заводу ПАТ «АЗОКМ» раціональну конструкцію розподільного трійника і кристалізатора МНБЛЗ, що дозволяють скоротити кількість дефектів і підвищити швидкість розливання, а також розробити технологічний процес виготовлення плит кристалізатора з міді вогневого рафінування і виконати їх дослідно-промислове освоєння і впровадження у виробництво.

Об'єкт дослідження. Процес розливання на МНБЛЗ зливків прямокутного перетину з міді вогневого рафінування.

Предмет дослідження. Теплофізичні та гідродинамічні процеси, що протікають в міді вогневого рафінування при її розливанні на МНБЛЗ в зливки, що мають прямокутний перетин.

Методи дослідження. Дослідження виконані з урахуванням основних положень теорії кристалізації металів. Використані стандартні методики випробування на розрив, скручування до руйнування і визначення електроопору. Оцінка стійкості міді до окислення проводилась методом втрати маси зразка. Визначення теплопровідності проводилося шляхом безпосереднього вимірювання електроопору з наступним перерахуванням за номограмою Відемана-Франца. При експериментальних дослідженнях використано термометрування об'єкта дослідження в промислових умовах. Форма і розміри фронту твердіння вивчалися методом введення в лунку сторонніх металів з подальшим металографічним вивченням поздовжніх макрошліфів. Для визначення величини кута змочування досліджуваної поверхні розплавом використовували метод лежачої краплі. Дослідження перемішування потоків рідини в кристалізаторі виконувалися на лабораторній установці,

яка дозволяла візуалізувати процеси, що супроводжують заповнення лунки, а також виконувати якісну оцінку процесів розподілу рідини. Розрахунок процесу теплопередачі і температурних полів в мідному зливку прямокутного перерізу, в процесі кристалізації, виконувався на ЕОМ відповідно до програми «Cukrist», що розроблена в ДВНЗ «Донецький національний технічний університет».

Наукова новизна отриманих результатів. Наукову новизну дисертації представляють наступні її положення:

1. Отримали подальший розвиток уявлення про основні властивості міді вогневого рафінування як нового конструкційного матеріалу.

Встановлено, що сировинна база, яка склалася в Україні, і технологія вогневого рафінування, що застосовується, забезпечують в отриманій міді вміст нікелю 100-150 ppm, олова 20-70 ppm і срібла 100-200 ppm. Катанка з міді вогневого рафінування, після холодної пластичної деформації з відносним обтисненням 50 %, має температуру початку рекристалізації 245 °С, межу міцності - 355 МПа. Електроопір катанки вогневого рафінування становить 0,01702 - 0,01716, $\times 10^{-6}$ Ом • м, при цьому вплив основних домішок на електроопір міді описується рівнянням:

$$\rho = 0,01705 + 0,00233\text{Sn} + 0,006355\text{Ni} - 0,00129\text{Ag} \times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

2. Отримали подальший розвиток уявлення про вплив фосфору на теплопровідність міді вогневого рафінування, температуру її знеміцнення та температуру початку рекристалізації.

Встановлено, що найбільш висока температура початку рекристалізації та найбільша теплопровідність в міді вогневого рафінування, які не поступаються аналогічним показникам сплавів з міді електролітичного рафінування, забезпечуються при вмісті фосфору 40-120 ppm. Для продукції з міді вогневого рафінування, деформованої в холодному стані з відносним обтисненням 30-70 % отримано значення теплопровідності 370-400 Вт/м×К, температури знеміцнення 410-440 °С, температури початку рекристалізації 370-400 °С (при вмісті нікелю 100-150 ppm, срібла - 100-200 ppm, олова - 20-70 ppm). При вмісті фосфору 0-40 ppm при нагріванні холоднодеформованої міді до 200-800 °С можливий розвиток явища, при якому межа міцності знижується до 120-150 МПа, а відносне подовження не виростає більше 15-18 %. При вмісті фосфору 120-255 ppm відбувається зниження теплопровідності до 346-370 Вт/м×К.

3. Отримали подальший розвиток уявлення про вплив потоків міді в мідному кристалізаторі на процеси формування лунки при розливанні міді вогневого рафінування методом напівбезперервного лиття.

За допомогою фізичного моделювання та експериментів у промислових умовах показано, що глибина проникнення рідкої лунки залежить від частки міді, яку спрямовано з литникової системи в донну частину. При однакових режимах лиття глибина проникнення лунки склала 225 мм і 270 мм для зливків з подачею міді вгору і вниз відповідно. Показано, що подача металу вгору призводить до розвитку процесів хвилеутворення на поверхні і спотворенням форми лунки, а при подачі міді вниз можливе формування кірки на меніску у верхній частині, що призводить до формування хвилястості і складчастості на поверхні зливків. Крім то-

го, глибока лунка, потрапляючи під зосереджене вторинне охолодження під кристалізатором, сприяє формуванню внутрішніх тріщин у зливку, обмежуючи таким чином максимальну швидкість лиття. Встановлено, що для підвищення продуктивності МНБЛЗ та забезпечення якості поверхні заготовок, співвідношення потоків міді, які спрямовані до дзеркала і до дна лунки, має бути в інтервалі (30-40 %)/(60-70 %).

4. Отримали подальший розвиток уявлення про формування злиwkів напівбезперервного лиття з міді вогневого рафінування.

Показано, що у зв'язку з високою теплопровідністю міді, що розливається, і недостатньою жорсткістю широких стінок прямокутного кристалізатора, під час розливання міді вогневого рафінування відбувається деформація широких стінок внаслідок виникнення термічних напруг, з вигинанням їх в бік заготовки на величину 4-8 мм і утворення на поверхні заготовки улоговини, яка проявляється в тому, що товщина зливка по краях на 4-8 мм більша, ніж посередині. Встановлено, що зливки з улоговиною характеризуються наявністю поздовжньо орієнтованих поверхневих тріщин, які є кінцевим браком.

Практичне значення отриманих результатів підтверджене підвищенням ефективності виробництва злиwkів з міді вогневого рафінування в умовах ПАТ «АЗОКМ», як наслідок скорочення часу процесів рафінування та розливання міді, зменшення кількості невідповідної продукції і скорочення витрат на виготовлення кристалізаторів, і полягає в наступному.

1. Під час виконаних досліджень показано, що мідь вогневого рафінування, у разі її використання для виготовлення стінок слябових кристалізаторів МНБЛЗ, є адекватною заміною міді електролітичного рафінування. З міді вогневого рафінування виготовлені кристалізатори і успішно випробувані в умовах ПАТ «АЗОКМ». Визначено хімічний склад міді, при якому реалізується раціональне поєднання фізико-механічних властивостей, що необхідні для виготовлення плит кристалізаторів.

2. Розроблена методика комплексного дослідження властивостей рафінованої міді може використовуватися при вивченні властивостей мідних сплавів. Відповідно до розробленої методики визначення якісних характеристик взаємодії міді вогневого рафінування з покриттями стінок кристалізатора можуть виконуватися дослідження різних видів покриттів. Отримана в роботі залежність електроопору рафінованої міді від вмісту домішок може бути використана у виробничих умовах для керування процесом рафінування на завершальній стадії. Отримані в роботі діаграми наклепу та знеміцнення міді вогневого рафінування, а також залежності температури початку рекристалізації і теплопровідності від вмісту фосфору, можуть застосовуватися в інженерних і технологічних розрахунках, які стосуються обробки та використання міді вогневого рафінування.

3. Розроблена конструкція кристалізатора для установок розливання мідних злиwkів прямокутного перерізу розміром 200×600 мм, в якій профіль робочого простору виконаний увігнутим на дві третини висоти з прогином 1,5-2,5 мм, реалізована на ПАТ «АЗОКМ». Зміна профілю робочого простору призвела до скорочення деформації плит широких граней кристалізатора в 7-8 разів, що дозволило збільшити міжреставраційний період практично в 2,5-3 рази.

Використання в промисловому виробництві ПАТ «АЗОКМ» розробленого комплексу нових рішень, при випуску 1923,3 т/рік мідних злитків прямокутного перерізу, забезпечує отримання ресурсозберігаючого ефекту 302,1 тис. грн. на рік (частка здобувача).

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» при вивченні курсів «Кольорова металургія» та «Безперервне розливання сталі».

Особистий внесок здобувача. Основні ідеї досліджень належать автору дисертації. Автором вироблені раціональні критерії до завершальної стадії процесу рафінування, визначені відмінності у фізико-механічних властивостях міді вогневого рафінування від міді електролітичного рафінування, встановлено раціональне співвідношення потоків в лунці рідкої міді, визначена раціональна конфігурація внутрішньої порожнини кристалізатора, а також розроблена технологія розливання і подальшої обробки заготовок плит кристалізаторів. Розробки, що виконані спільно з співробітниками ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», «Донбаський державний технічний університет», ПАТ «АЗОКМ», «Інститут проблем матеріалознавства НАНУ», знайшли відображення в сумісних статтях. Конкретний особистий внесок здобувача даний у вигляді коротких анотацій після зазначення їх номерів у списку опублікованих робіт за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації обговорені на: науково-технічній конференції «Современный технологический комплекс сталеплавильного производства и приоритетные направления развития процессов внепечной обработки и непрерывной разливки стали в Украине», Донецьк, 2008 р.; VI міжнародній науково-практичній конференції «Научно-технический прогресс в металлургии», Алмати, 2011 р.; науково-практичному семінарі кафедри «Металургія сталі» ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (2013 р.); 10-й Міжнародній науково-технічній конференції «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ'13), Санкт-Петербург, 2013 р.; XIX-й Міжнародній науково-технічній конференції «Современные огнеупоры: ресурсосбережение и применение в металлургических технологиях», Донецьк, 2013 р.; IV-й Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве», Краматорськ, 2013р.; 12-й науково-технічній конференції «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения», Москва, 2013 р.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 14 наукових робіт. Основні наукові результати дисертаційної роботи викладені в 9 публікаціях. Додаткові результати викладені в 5 публікаціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів та додатків. Повний обсяг дисертації становить 170 сторінок, на яких наведено 63 рисунки, 19 таблиць і 5 додатків. Список використаних джерел включає 137 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Аналіз сучасних тенденцій розвитку технологічних аспектів безперервного і напівбезперервного розливання міді та її сплавів» виконано аналіз ряду технологічних побудов з виготовлення прокату з брухту та відходів, які склалися на Україні в умовах відсутності рудної сировини. Показано, що найбільш ефективним з них є використання технології вогневого рафінування міді. Разом з тим, матеріал, що одержується за такою технологією, має специфічні відмінності. Проведені останнім часом дослідження, які спрямовані на розвиток теорії вогневого рафінування міді, не є закінченими і потребують подальшого продовження в напрямі визначення обґрунтованого змісту основних домішок на завершальному етапі рафінування, що забезпечують задані властивості готової продукції. Подальшого вивчення також вимагають відмінності у фізико-механічних властивостях міді вогневого рафінування, у порівнянні з міддю електролітичного рафінування, що традиційно використовується у промисловості.

Для умов ПАТ «АЗОКМ» з технологією отримання міді вогневого рафінування в газовій відбивній печі найкраще стикується технологія напівбезперервного лиття зливків, що обумовлено специфікою роботи печі, з одного боку, і сортаментом продукції, що виготовляється, з іншого. При цьому, методу напівбезперервного лиття притаманні нестационарні процеси початку та завершення лиття, а також невисока швидкість, внаслідок чого має місце значний осьовий тепловий потік, а процес твердіння зазвичай закінчується в межах кристалізатора. Врахування осьового теплового потоку при проектуванні кристалізаторів сприятиме поліпшенню характеру твердіння і підвищенню якості зливків.

На сьогоднішній день накопичений великий обсяг інформації з питань вивчення дефектів на безперервнолитих зливках, проте цей досвід в основному стосується процесів безперервного лиття або розливання зливків з міді електролітичного рафінування, а стосовно до міді вогневого рафінування, що розливається напівбезперервним методом - вимагає певних уточнень. Разом з тим основні дефекти зв'язувалися з умовами формування зливка в кристалізаторі, а тому дослідження, спрямовані на вивчення як процесів тепломасообміну в лунці рідкого металу, так і процесів термомеханічної взаємодії безперервнолитого зливка зі стінками кристалізатора, видаються актуальними. Дослідження таких процесів зазвичай проводиться з використанням методів математичного моделювання, результати якого не завжди однозначні, що, мабуть, пояснюється вибором початкових умов і вихідних даних. Уточнення параметрів моделі, стосовно до конкретних умов розливання міді вогневого рафінування, підвищить точність розрахунків, що сприятиме створенню кристалізатора раціональної конструкції і забезпечить підвищення якості продукції, що випускається.

Збільшення товщини хромового покриття, що використовується в даний час з метою збільшення стійкості кристалізаторів, не забезпечує стабільності технологічного процесу розливання, оскільки таке покриття піддається непрогнозованому розтріскуванню та відшаруванню, що призводить до зниження якості зливків. Це обумовлює проведення подальших досліджень з оцінки характеру взаємо-

дії міді вогневого рафінування з різними матеріалами з метою підбору покриттів, що мають більш широкий спектр експлуатаційних властивостей.

На основі проведеного аналізу сучасної літератури та промислового досвіду визначено мету та шляхи дослідження процесу розливання міді вогневого рафінування в кристалізатор прямокутного перерізу з мідними теплопровідними стінками.

У другому розділі «Методики дослідження та фізичне моделювання» вироблені та обгрунтовані засоби вивчення фізико-механічних властивостей міді вогневого рафінування. Зокрема автором розроблена методика комплексної оцінки властивостей міді вогневого рафінування. Крім того, наводиться методика оцінки впливу хімічного складу на електроопір, розроблена методика оцінки взаємодії рідкої міді з різними покриттями, а також розроблена фізична модель для дослідження процесів масообміну в кристалізаторі.

Для порівняльної оцінки міцності і пластичних властивостей зразків рафінованої міді застосовували стандартні випробування на розтяг по ГОСТ1497-84 і скручування до руйнування по ГОСТ1545-80. Допустима похибка машини при виконанні випробувань на розтяг становила $\pm 1\%$. Кількість скручувань визначена з точністю ± 1 оберт.

Здатність міді вогневого рафінування до деформаційного зміцнення прокаткою на гладких валках оцінювалася шляхом побудови кривих наклепа за результатами випробувань зразків на розтяг. Випробування на твердість виконувалися на зразках довжиною 50 мм по ГОСТ 9012 HB1/10 на твердомірі моделі ZHV10 фірми «Zwick / Roell».

Температура початку рекристалізації визначалася шляхом відпалу зразків товщиною 0,4 мм, прокатаних на реверсивному стані Кварто-250 зі ступенем деформації 95 %.

Для оцінки впливу хімічного складу рафінованої міді на її теплопровідність використовувався показник електроопору, який за відомою номограмою Відемана-Франца перераховувався в теплопровідність (рисунок 1). Електропровідність матеріалу визначалася вихрострумовим методом на приладі «SIGMATEST 2.069» фірми «FoersterInstruments» (Німеччина) при частоті струму 60 кГц.

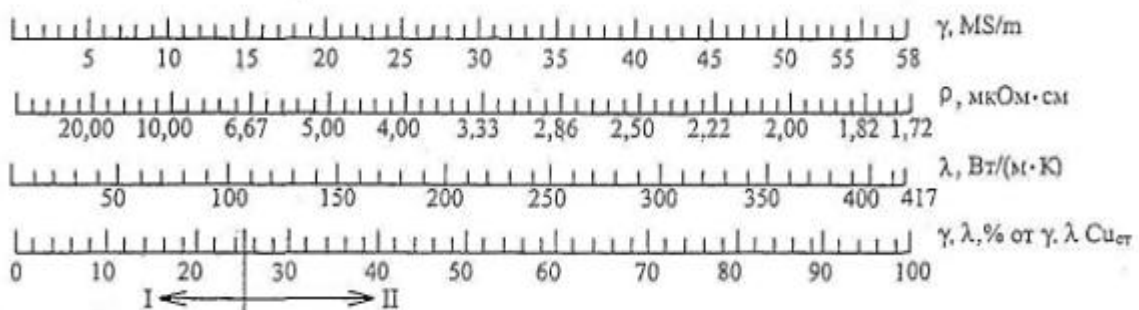


Рисунок 1. Номограма для визначення теплопровідності матеріалів за показниками їх електропровідності та електричного опору (співвідношення Відемана-Франца) приймається умовно - I, дотримується II

В результаті поелементного аналізу хімічного складу міді вогневого рафінування визначено, що вирішальний вплив на електроопір має вміст олова, срібла і нікелю. Керуючись правилом Матіссена-Флемінга, визначено загальний вид залежності:

$$\rho = \rho_0 + \rho_{\text{пр}}, \quad (1)$$

де ρ_0 - питомий електроопір рафінованої міді;

$\rho_{\text{пр}}$ - залишковий електроопір, обумовлений наявністю атомів домішок, пропорційний концентрації добавки.

Хімічний склад сплаву визначали на попередньо механічно обробленій поверхні зразка з шорсткістю не більше Ra 2.5 атомно-емісійним методом в середовищі аргону на приладі ARL4460. Кожен зразок тестували три рази і результати усереднювали. За температуру знеміцнення приймалася температура годинного відпалу, відповідна половині падіння параметру, зокрема міцності і твердості між максимальним і мінімальним її значенням. За температуру початку рекристалізації приймалася температура, відповідна 10 % падіння параметру.

Стійкість міді до окислення оцінювалася за відомою методикою втрати маси зразка під час корозійного впливу.

Для визначення величини кута змочування досліджуваної поверхні розплавом міді вогневого рафінування використовували відомі методи лежачої краплі і Дорсея. Дослідження впливу різних покриттів мідних стінок на умови тепловідведення і структуру одержуваних мідних злитків вивчали на фізичній моделі кристалізатора. Одна пара протилежних стінок моделі не мала покриття, а на дві інші методом високошвидкісного повітряно-паливного напилення були нанесені шар Ni і Ni-Cr покриття відповідно.

Фізичне моделювання гідродинаміки потоків в кристалізаторі МНБЛЗ виконувалося на лабораторній установці (рисунок 2), виконаної в масштабі 1:1 по відношенню до об'єкта моделювання.

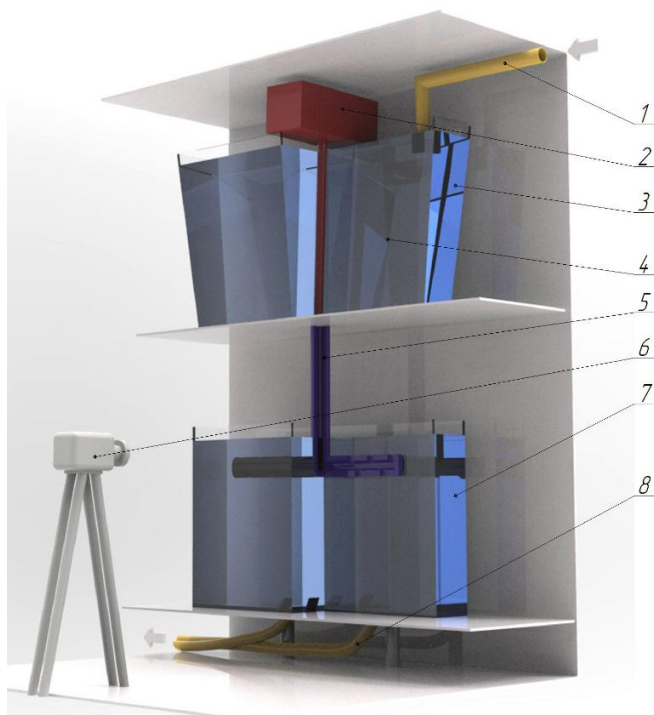


Рисунок 2. Схема лабораторної установки для вивчення гідродинаміки потоків в кристалізаторі МНБЛЗ:

- 1 - підвідний трубопровід;
- 2 - стопорний пристрій;
- 3 - розливна коробка;
- 4 - модельна рідина;
- 5 - розподільний трійник;
- 6 - відеокамера;
- 7 - модель кристалізатора;
- 8 - система відводу води

В якості робочої рідини використовували воду при температурі 18 - 22 °С. Як основні критерії гідродина-

мічної подібності для моделювання процесів руху рідини в кристалізаторі використовували критерій Фруда (Fr) і критерій гомохронності (Ho). Положення фронту твердіння імітувалося за допомогою зігнутої спеціальним чином пластики. При цьому інформація про розташування фронту твердіння була отримана на підставі даних зондування рідкої фази реального зливка шляхом занурення в неї сталевго прута до зіткнення з фронтом твердіння. Витрата рідини, що подається в кристалізатор, вибиралася відповідно до швидкості витяжки заготовки. Рух потоків рідини в кристалізаторі фіксувався за допомогою цифрової відеокамери та підфарбовування кольоровим чорнилом локальних обсягів порцій рідини, що витікають з системи ливника.

У третьому розділі «Дослідження властивостей міді вогневого рафінування» виконані порівняльні дослідження фізико-механічних властивостей міді вогневого і електролітичного рафінування, стійкості міді до окиснення, характеру взаємодії міді з різними покриттями.

Результати досліджень відносного подовження і скручування до руйнування у вигляді порівняльних гістограм представлені на рисунку 3. Встановлено, що для катанки з міді вогневого рафінування кількість скручувань до руйнування на 3 % нижча, а відносне подовження на 2,5 % менше, ніж для катанки з міді електролітичного рафінування відповідно.

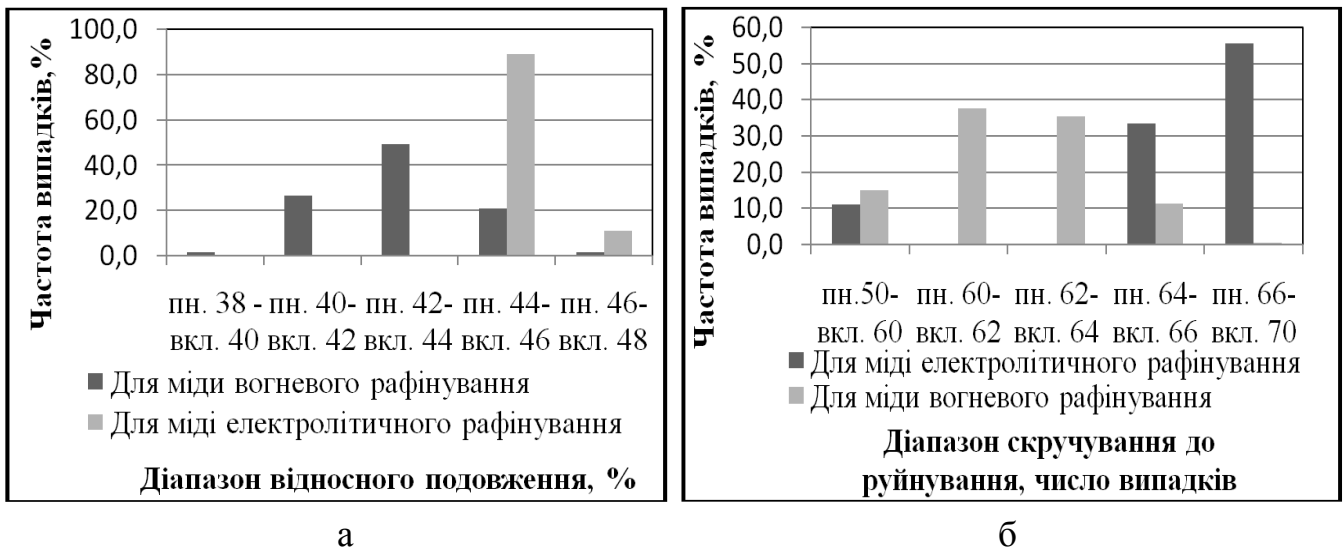


Рисунок 3. Порівняльні гістограми значень відносного подовження (а) і показника скручування до руйнування (б) для катанки Ø8 мм

Разом з тим всі показники відносного подовження більш ніж на 2 % вищі, ніж мінімальне значення, регламентоване для прокату м'якого стану згідно ГОСТ1173-2006. Зазначена різниця пояснюється істотно більшим змістом домішок у міді вогневого рафінування, що мають обмежену розчинність в міді (свинець, сурма і вісмут), які під час кристалізації по межах зерен послаблюють їх. Зазначені відхилення не є критичними, що дозволяє використовувати мідь вогневого рафінування як конструкційний матеріал. Межа міцності для зразків з міді вогневого рафінування трохи вища у всьому досліджуваному діапазоні (рисунок 4). Наприклад, при деформації з відносним обтисненням 50 %, межа мі-

цності для зразків з міді вогневого рафінування на 30 МПа (майже на 10 %) вища, ніж для зразків з міді електролітичного рафінування.

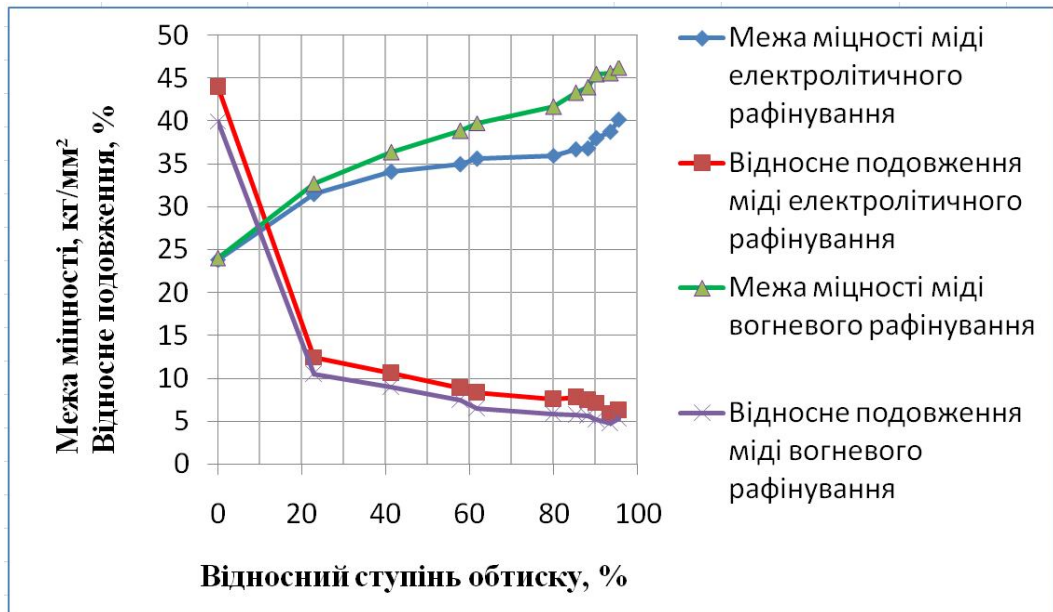


Рисунок 4. Зміни межі міцності і відносного подовження залежно від ступеня обтиску для зразків з міді вогневого і електролітичного рафінування

Встановлено, що у міді вогневого рафінування температура початку рекристалізації на 45 °С вища, ніж у міді електролітичного рафінування (рисунок 5), що вигідно відрізняє таку мідь при її використанні для виготовлення кристалізаторів. При цьому більш висока міцність і температура початку рекристалізації пов'язана з наявністю в міді вогневого рафінування певної кількості срібла, нікелю та олова.

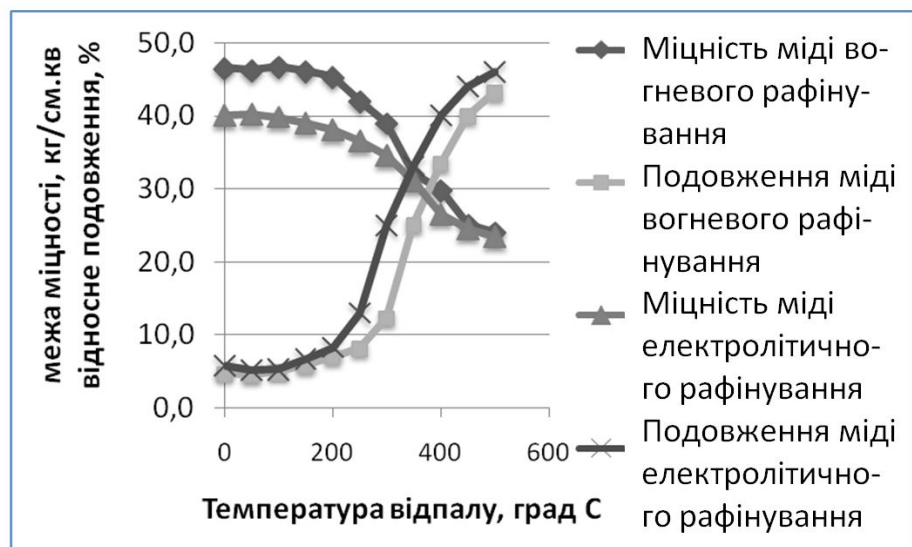


Рисунок 5. Порівняльні діаграми знеміцнення зразків твердого стану, отриманих з міді електролітичного і вогневого рафінування

Результати виконаного статистичного аналізу даних 652 зразків мідної катанки Ø8 мм показують, що середнє значення величини електроопору катанки з міді вогневого рафінування становить $0,017131 \cdot 10^{-6}$ Ом•м, у той час, як опір катанки з міді електролітичного рафінування становить $0,01710 \cdot 10^{-6}$ Ом•м. При цьому вплив основних супутніх хімічних елементів на величину електроопору (ρ) катанки з міді вогневого рафінування можна представити у вигляді наступної кореляційної залежності (2):

$$\rho = 0,01705 + 0,00233 \text{ Sn} + 0,006355 \text{ Ni} - 0,00129 \text{ Ag} \times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}, R^2 = 0,952 \quad (2)$$

Отримані дані свідчать про те, що за інтенсивністю тепловідведення мідь вогневого рафінування не поступається міді електролітичного рафінування. При цьому дослідження показали, що теплопровідність істотно залежить від вмісту фосфору в міді. Залежність теплопровідності від вмісту фосфору отримана для металу з урахуванням впливу попереднього наклепу. Залежність теплопровідності, а також температур знеміцнення по міцності і твердості від вмісту фосфору в мідному сплаві (рисунок 6) добре описується відповідними рівняннями регресії (3-5):

$$y = 0,0007x^2 - 0,4517x + 416,08, \quad R^2 = 0,967; \quad (3)$$

$$y = -0,0005x^2 + 0,3589x + 401,53, \quad R^2 = 0,914; \quad (4)$$

$$y = -2E - 05x^2 + 0,217x + 409,46, \quad R^2 = 0,947. \quad (5)$$

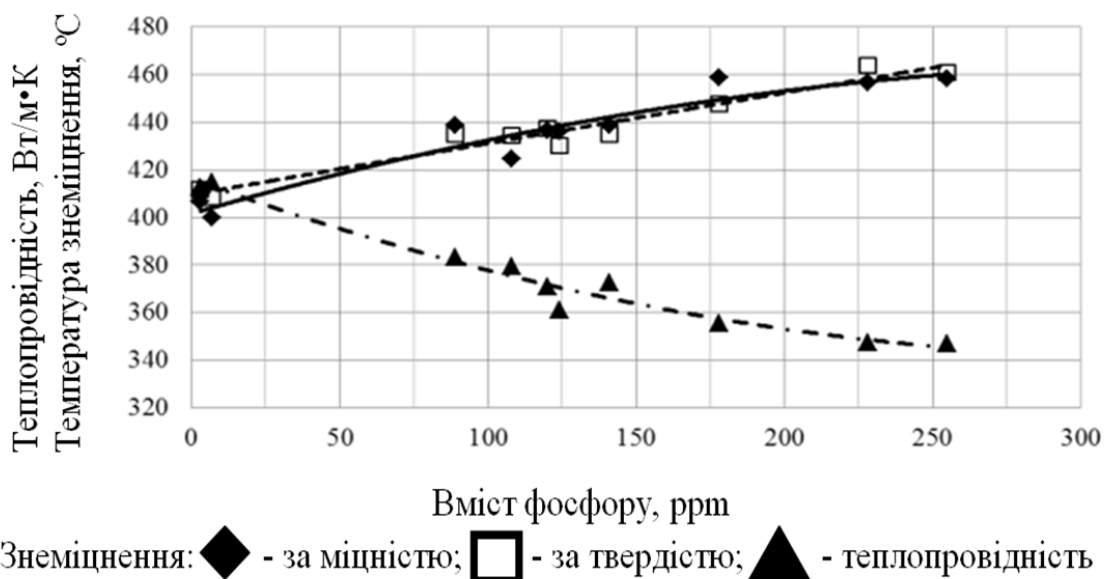


Рисунок 6. Залежності температури знеміцнення і теплопровідності від вмісту фосфору в міді

При визначенні раціональних меж за вмістом фосфору встановили, що при його вмісті менше 40 ppm під час нагрівання холоднокатаних напівфабрикатів можливе формування нерівномірної, блокової мікроструктури, що має низькі механічні властивості (рисунок 7), причому визначено, що для міді вогневого рафінування таке явище настає при більшій залишковій концентрації фосфору, ніж для міді електролітичного рафінування. Більш висока концентрація фосфору призво-

дить до істотного зниження теплопровідності і зростанню температури знеміцнення. З урахуванням того, що зростання температури знеміцнення досягається також за рахунок елементів, що мають менший вплив на теплопровідність, доцільно максимальний вміст фосфору обмежувати.

Узагальнюючи графіки залежностей, встановлено, що раціональний вміст фосфору в сплаві знаходиться в інтервалі 40-120 ppm. При цьому теплопровідність сплаву буде знаходитися в інтервалі 370-400 Вт/м•К, температура знеміцнення складе 410-440 °С, а температура початку рекристалізації - 370-400 °С. Додатково встановлено, що відпал після холодної деформації в інтервалі температур 320 - 350 °С здатний підвищити теплопровідність міді на 1-2 %.

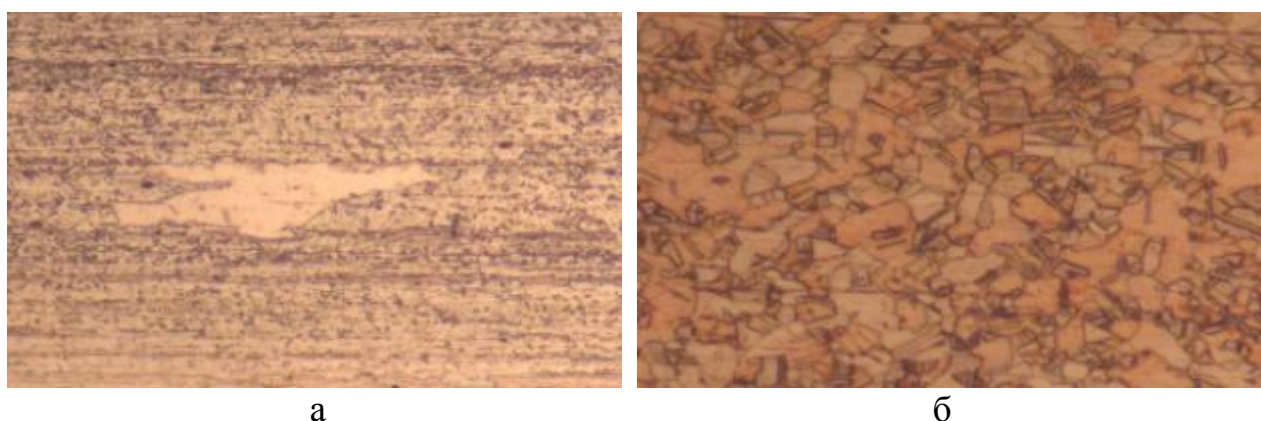


Рисунок 7. Мікроструктура зразків відпаленого мідного прокату з вмістом фосфору 0,002 % (а) і 0,007 % (б) - збільшення - $\times 200$

Під час виконання робіт з дослідження якісних характеристик взаємодії міді вогневого рафінування з різними покриттями встановлено, що застосування спеціальних захисних покриттів, що наносяться на робочі поверхні стінок кристалізаторів МБЛЗ, є досить ефективним прийомом, що забезпечує підвищення якості поверхні і підповерхневого шару зливка. При цьому ефективність роботи покриття залежить від його товщини, хімічного складу, способу нанесення та інших факторів. Показано, що нікелеве та нікель-хромове покриття, нанесені методом високошвидкісного повітряно-паливного напилення, забезпечують підвищення якості поверхні зливка, в тому числі запобігають появі хвилястості і складок (рисунок 8). Це слід пов'язувати зі зменшенням кута змочування поверхні стінок кристалізатора металом, що заливається, а також зі зниженням інтенсивності тепловідведення через них. Для злиwkів із рафінованої міді рекомендовано нікелеве захисне покриття, оскільки воно забезпечує досягнення високих показників якості підповерхневого шару зливка, зокрема високої міцності і порівняно низькою пористістю скоринки.

Під час дослідження стійкості міді до окиснення при температурах 500-700 °С визначено, що мідь вогневого рафінування при нагріванні окиснюється в середньому на 18-20 % інтенсивніше міді електролітичного рафінування, що зв'язується з більш високим вмістом кисню. На практиці це потребує врахування при розробці режимів нагріву злиwkів перед прокаткою з метою зменшення кількості дефектів, обумовлених окалиною.

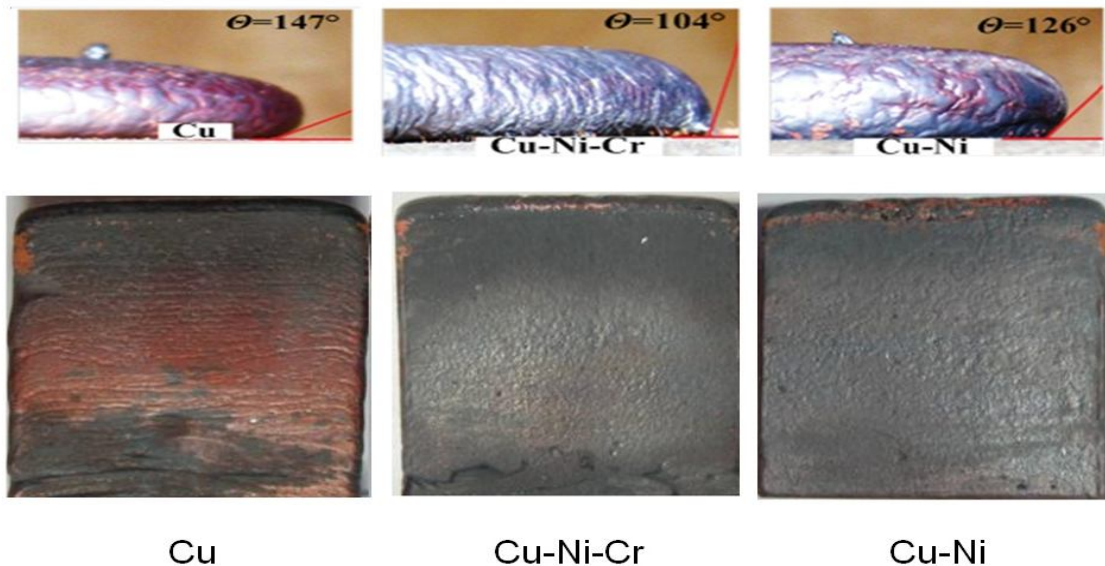


Рисунок 8. Поверхні мідного зливка, які відлито з різними покриттями стінок

В цілому, виконані дослідження показали можливість виготовлення стінок кристалізатора з міді вогневого рафінування замість міді електролітичного рафінування. При цьому показано доцільність використовувати нікелеве захисне покриття для стінок кристалізатора при розливанні міді вогневого рафінування.

У четвертому розділі «Вивчення динаміки формування зливка при напівбезперервному литті рафінованої міді» в результаті виконаного аналізу технологічного побудування ПАТ «АЗОКМ» показано, що потребує вирішення низка проблемних питань, які пов'язані в першу чергу зі специфічними відмінностями міді вогневого та електролітичного рафінування. Ці особливості обумовлюють необхідність удосконалення конструкції кристалізатора і власне технологічного процесу розливання міді вогневого рафінування на основі комплексних теоретичних досліджень.

Одним із зовнішніх проявів таких відмінностей є різниця сумарної ливарної усадки зливків. У ході промислових експериментів встановлено, що для зливків з міді вогневого рафінування середня усадка становить 2,26 %, а для зливків з міді електролітичного рафінування усадка становить 2,91 %. Різниця в 0,66 % пояснюється спадково великим вмістом кисню в міді вогневого рафінування, який вступаючи в реакцію з домішками сірки і водню, сприяє утворенню в зливках мікропор, заповнених продуктами реакції. Фактично визначену величину усадки надалі враховували при проектуванні кристалізаторів.

Шляхом дослідження на фізичних моделях різних конструкцій систем ливників для подачі мідного розплаву в кристалізатор і перевірки результатів моделювання в промислових умовах встановлено істотний вплив напрямку потоків на конфігурацію фронту твердіння (рисунок 9). У розвиток виконаних досліджень розроблено удосконалений варіант цієї системи. При використанні нової конструкції трійника забезпечується необхідний підігрів верхньої частини лунки, а в нижній її частині рідинні струмені перемішують ванну. При цьому вони не впливають на формування твердої фази. Раціональне співвідношення потоків, при якому 30-40 % рідкого металу прямує вгору, а 60-70 % - вниз рідкої ванни, забезпечують

шість отворів діаметром 12 мм, які виконані у верхній частині трійника, і шість отворів внизу на кожному патрубку трійника (діаметр 10-12 мм).

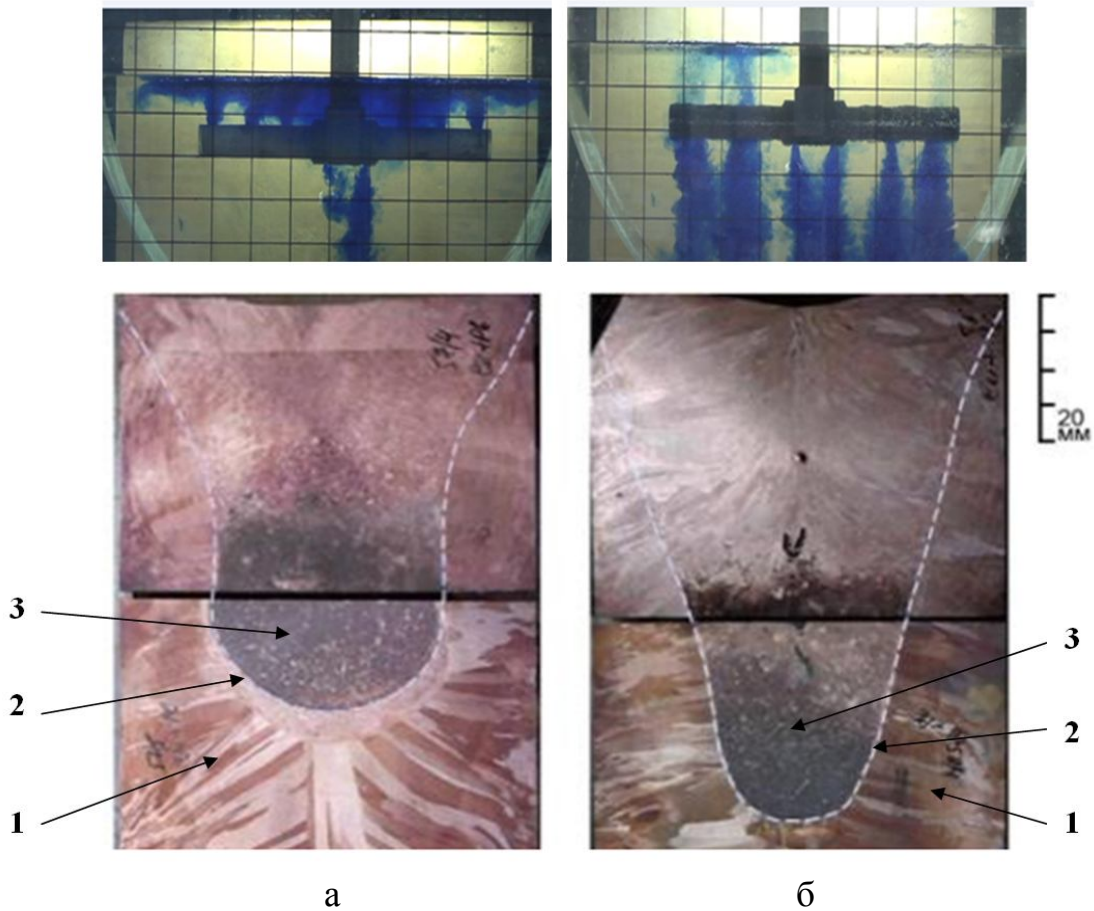


Рисунок 9. Результат моделювання потоків та конфігурація фронту твердіння при спрямуванні металу: а – до дзеркала ванни; б – до низу лунки; 1 – мідний зливков, 2 – фронт твердіння, 3 – мідь, збагачена свинцем

Осьовий тепловий потік, властивий методу напівбезперервного лиття, оцінювали шляхом металографічних досліджень поздовжніх темплетів злиwkів, що відбирали на різних стадіях розливання. Визначено, що частка осьового теплового потоку в початковий момент лиття – 30,1 %, в сталому процесі лиття – 37,8 %, на завершальному етапі лиття – 47,0 % (рисунок 10).

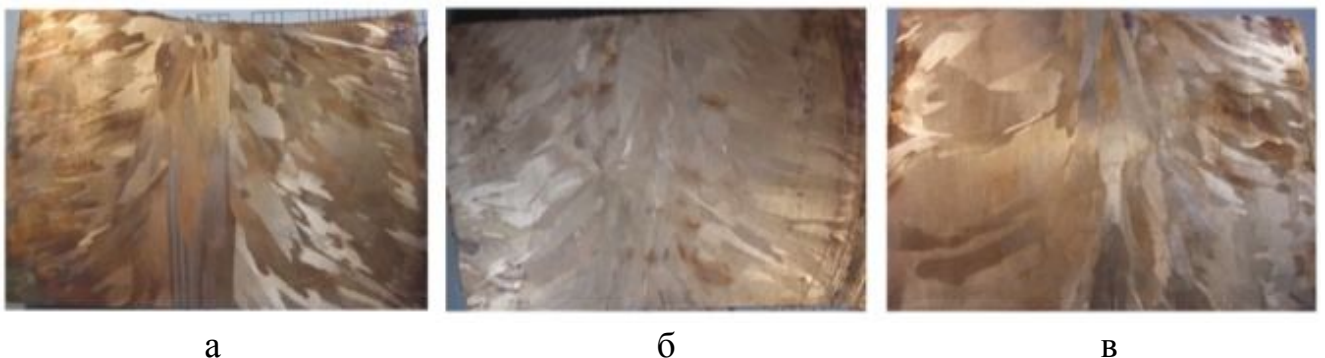


Рисунок 10. Металографічний аналіз поздовжніх темплетів злиwkів: а – кінець лиття; б – технологічна швидкість; в – початок лиття

Для уточнення подальших розрахунків, було виконано термометрування стінки кристалізатора в промислових умовах, під час яких встановлено, що температура мідної стінки на відстані 5 мм від поверхні, що охолоджується водою, становить 51-81 °С, залежно від режимів розливання.

Питання збільшення швидкості розливання та підвищення якості зливків раніше вирішувалося на ПАТ «АЗОКМ» шляхом заміни кристалізатора без конусності двоконусним кристалізатором. Однак виробнича практика використання такої конструкції виявила ряд недоліків. Внаслідок збільшення теплового потоку на 25-30 % мідна стінка в середній частині стала істотно деформуватися, що було пов'язане з розтріскуванням і відшаруванням хромового покриття в місцях інтенсивної деформації, а також із його механічним зносом в нижній частині (рисунок 11). Широка грань зливків, відлитої в такі кристалізатори, мала увігнутість всередину у вигляді улоговини, і характеризувалася наявністю поздовжньо орієнтованих поверхневих тріщин, які при подальшій поперечній прокатці розкривалися, приводячи до остаточного браку гарячекатаних напівфабрикатів (рисунок 12).

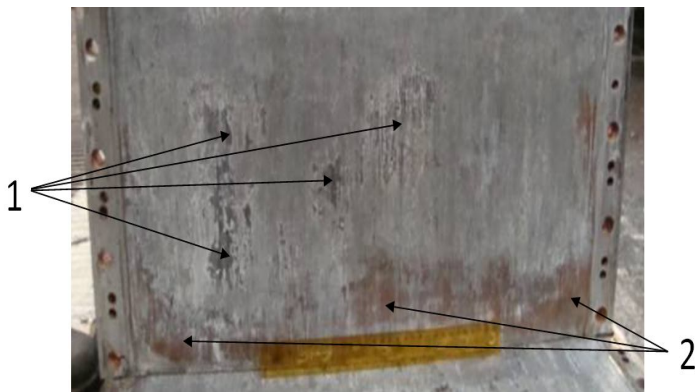


Рисунок 11. Зношення покриття кристалізатору: 1 – розтріскування і відшарування; 2 – механічне зношення



Рисунок 12. Тріщина на поверхні зливка, що розкрилася під час прокатки

Вивчаючи природу утворення таких тріщин, встановлено, що вони поширюються по межах кристалів, а в зломі мають яскраво виражений дендритний характер. З урахуванням того факту, що поява тріщин поєднується з наявністю на зливку улоговини, вивчалася залежність цього параметру від конусності в середній частині кристалізатора і швидкості розливання (рисунок 13). Встановлено, що зі збільшенням швидкості розливання глибина улоговини має тенденцію до зростання, що обумовлено наростанням термічних напруг. Збільшення конусності в середній частині кристалізатора формує сочевичний профіль у його верхній частині, а тому призводить до зниження улоговини. При цьому величина конусності більше 2,5 мм спричиняє різке зростання навантаження на привід ливарної машини, що пов'язано з інтенсивною деформацією твердої скоринки.

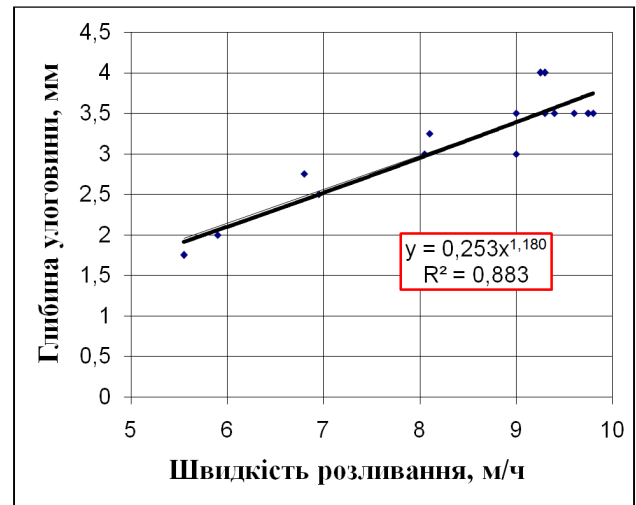
У *п'ятому розділі «Використання розробок у виробництві»* уточнено параметри математичної моделі «Сукрист», розробленої раніше в ДНВЗ «Донецький національний технічний університет». При цьому враховували фактично визначе-

ні в даній роботі величини, сформовані у виробничих умовах при розливанні рафінованої міді. Зокрема змінені наступні параметри:

- осьовий тепловий потік прийнятий 37,8 % від загального потоку;
- температура рідкого металу в кристалізаторі, з урахуванням фактичного падіння температури в стопорно-розливній системі, прийнята 1108 °С;
- температура мідної стінки на відстані 5 мм від поверхні, що охолоджується водою, прийнята 70 °С;
- теплопровідність мідної стінки прийнята 385 Вт/м·К;
- межа міцності мідної стінки прийнята 320 МПа;
- ливарна усадка прийнята 2,26 %.



а



б

Рисунок 13. Вплив на улоговину конусності (а) та швидкості розливання (б)

З урахуванням виконаних розрахунків та експериментальних даних, розроблена і впроваджена у виробництво нова конструкція кристалізатора, в якій робочим поверхням плит широких граней надавали певну увігнутість у верхній частині (всередину плити), внаслідок чого середня частина плити набувала параболічну конусність, що сходиться нанівець в нижній, прямокутній частині кристалізатора (рисунок 14). Визначено, що максимальна увігнутість стінок кристалізатора посередині широкої грані повинна становити 1,5-2,5 мм на кожну грань, залежно від швидкості витяжки заготовки в інтервалі 5-10 м/год і витрати охолоджуючої води в інтервалі 8- 14 м³/ч для вузьких граней зливка і 18-28 м³/ч для широких граней. Рациональна довжина криволінійної частини плит кристалізатора повинна становити 0,7-0,8 від загальної їх висоти.

Для скорочення величини деформації плити кристалізатора запропоновано рішення, суть якого полягає в тому, що в нормальному стані робоча поверхня плити пряма, а частина, що контактує зі сталеву кришкою - увігнута. Під час збирання кристалізатора мідна плита притягується шпильками до кришки, внаслідок чого в ній виникають напруги, протилежні за знаком термічним напругам, що виникають при роботі кристалізатора.

Конструкція кристализатора з увігнутими стінками дозволила істотно (в 7-8 разів) зменшити величину відхилення внутрішньої поверхні посередині широких граней, за рахунок чого підвищити середню стійкість кристализаторів в 2,5-3 рази. З використанням оптимізованого розподільчого трійника в кристализатор нової конструкції в промислових умовах ПАТ «АЗОКМ» було відлито 128 зливків. Оцінку умов твердіння зливків виконували за наявності поздовжньо-орієнтованих міжкристалічних тріщин глибиною 5-20 мм, що виходять на поверхню заготовки. Встановлено, що кількість поздовжніх тріщин на поверхні злитків зменшується в 3-5 разів, що підвищує вихід придатної продукції в середньому на 8-12 %.

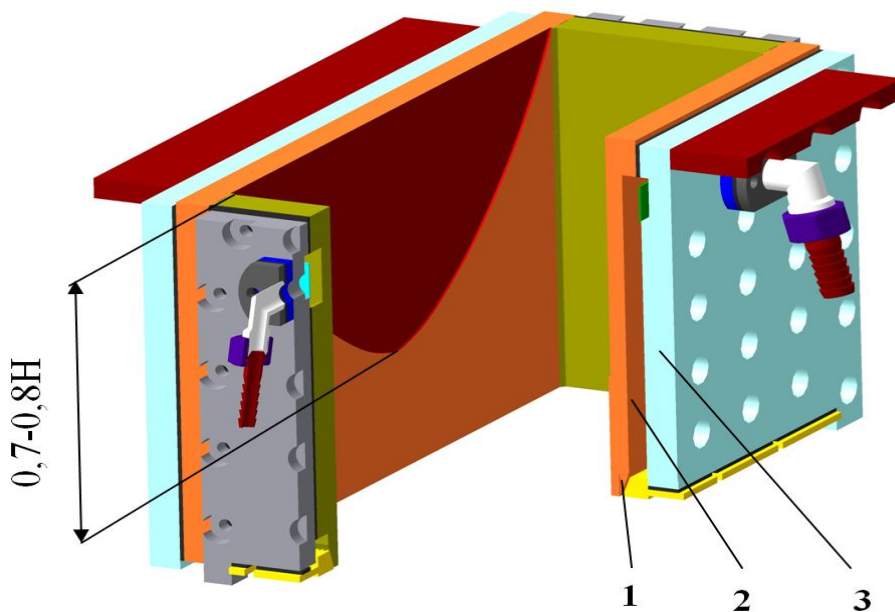


Рисунок 14. Конфігурація внутрішньої порожнини кристализатора:
1 – мідна стінка; 2 – охолоджуюча вода; 3 – сталева кришка

Впровадження результатів виконаних досліджень у виробництво ПАТ «АЗОКМ» суттєво стабілізувало технологію розливання і подальшої обробки міді вогневого рафінування, дозволило збільшити швидкість розливання на 25-30 %, що в цілому забезпечило отримання річного економічного ефекту в сумі 302,1 тис. грн. (частка здобувача).

ВИСНОВКИ

В дисертації вирішена актуальна науково-технічна задача з розвитку теорії розливання міді вогневого рафінування за рахунок поглиблення теоретичних уявлень про тепло- та масообмінні закономірності, що ураховують основні властивості міді вогневого рафінування як нового конструкційного матеріалу, в якому велике значення має вплив основних хімічних домішок на величину електроопору, теплопровідність, температуру знеміцнення та початку рекристалізації. Також вдосконалено технологію розливання рафінованої міді в напрямі збільшення

продуктивності та підвищення якості зливок шляхом вибору раціональної конфігурації внутрішньої порожнини кристалізатора та раціонального спрямування гідродинамічних потоків у лунці рідкого металу.

1. Аналіз літературних джерел показав, що стосовно міді вогневого рафінування досі були відсутні залежності властивостей готової продукції від її хімічного складу, а також інформація про відмінність міді вогневого рафінування від міді електролітичного рафінування. Традиційний підхід підвищення ефективності процесу розливання за рахунок максимального наближення внутрішньої порожнини кристалізатора до форми зливка, що твердіє, не враховує особливостей напівбезперервного розливання міді. Таким чином, актуальними видаються подальші теоретичні та експериментальні дослідження гідродинамічних процесів в умовах короткої лунки, а також вивчення теплофізичних умов твердіння, що забезпечує комплексний підхід в дослідженнях, відповідає сучасним тенденціям кольорової металургії та спрямовано на підвищення ефективності виробництва.

2. На основі виконаних досліджень фізико-механічних властивостей, показано незначну розбіжність у кількості скручувань до руйнування (- 3 %), відносному подовженні (- 2,5 %) і теплопровідності (- 0,2 %) міді вогневого рафінування та міді електролітичного рафінування. Встановлена істотна різниця наступних властивостей - межа міцності міді вогневого рафінування на 30 МПа вища, а температура початку рекристалізації на 45 °С більша, ніж у міді електролітичного рафінування. Це пов'язано з наявністю в міді вогневого рафінування певної кількості мікролегуючих добавок срібла, нікелю та олова, які традиційно використовують при створенні низьколегованих мідних сплавів. Проведені дослідження дають підставу стверджувати, що мідь вогневого рафінування при набагато меншій собівартості в більшості випадків є адекватною заміною міді електролітичного рафінування.

3. Встановлено, що теплопровідність міді вогневого рафінування 370 - 400 Вт/м•К, температура знеміцнення 410-440 °С і температура початку рекристалізації 370-400 °С забезпечуються при вмісті фосфору в сплаві 40-120 ppm, нікелю 100-150 ppm, срібла - 100-200 ppm, олова - 20-70 ppm. Зазначена теплопровідність на 20-60 Вт/м•К вища, ніж теплопровідність відомих низьколегованих мідних сплавів з аналогічною температурою початку рекристалізації.

4. Вперше встановлена залежність електроопору міді вогневого рафінування від вмісту домішок олова, нікелю і срібла у присутності залишкової кількості домішок Fe, As, Zn, S, Si, Al, Mn, Cd, Cr, Ti, Zr:

$$\rho = 0,01705 + 0,00233\text{Sn} + 0,006355\text{Ni} - 0,00129\text{Ag} \times 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м},$$

що дозволяє керувати процесом рафінування на завершальній стадії, з метою отримання заданого результату по електроопору.

5. Експериментально встановлено, що температура мідної стінки кристалізатора на відстані 5 мм від поверхні, що охолоджується водою, становить 70 °С, температура рідкого металу безпосередньо в лунці кристалізатора становить 1108 °С, осьова складова теплового потоку в зливку, що кристалізується в сталому процесі лиття, становить 37,8 %, а ливарна усадка становить 2,26 %. Експериментально встановлені параметри дозволили підвищити точність

математичної моделі для розрахунку усадки в мідному зливку прямокутного перерізу.

6. Під час дослідження гідродинамічних потоків в лунці рідкої міді встановлено, що найкращі результати, які забезпечують підігрів у верхній частині лунки вище за температуру плавлення, а в нижній частині лунки рідинні струмені не роблять впливу на формування твердої фази, досягаються за умови спрямування потоків рідини вгору і вниз кристалізатора, у співвідношенні (30-40 %) / (60-70 %).

7. Встановлено, що поява улоговини і поздовжніх тріщин, при литті мідних зливків прямокутного перерізу, пояснюються пружньопластичною деформацією мідної стінки кристалізатора під впливом термічних напруг, в наслідок чого виникає газовий зазор, що має найбільшу величину в середній частині широких граней зливків. Встановлено, що при появі зазору тепловідвід по периметру стає нерівномірним, що спричиняє зростання напружень у твердій оболонці зливка, які перевищують межу міцності матеріалу, що і призводить до тріщин.

8. Встановлено, що застосування нікелевого захисного покриття товщиною 250 мкм, що нанесене методом високошвидкісного повітряно-паливного напилення, при литті зливків з міді вогневого рафінування забезпечує одержання твердості скоринки зливка 60,0 HV, що на 13,5 HV вище, ніж при литті міді в кристалізатор без покриття. При цьому забезпечується порівняно низька пористість скоринки на рівні 10-500 мкм.

9. Запропоновано нову конструкцію кристалізатора, в якій передбачена увігнутість стінок у верхній частині кристалізатора на величину 1,5-2,5 мм, що перешкоджає формуванню улоговини по широких гранях зливка. Заданий профіль зливка забезпечується деформуванням його в нижній прямокутній частині кристалізатора. Розроблена і впроваджена технологія виготовлення плит кристалізатора з міді вогневого рафінування, яка відрізняється тим, що для збільшення їх стійкості передбачено збільшення межі міцності до 320-330 МПа шляхом холодної прокатки з відносним обтисненням 30 %, а для скорочення кількості дефектів, обумовлених окалиною, знижена на 100 °С температура нагріву зливків перед прокаткою.

10. Впровадження виконаних в роботі заходів у виробництво ПАТ «АЗОКМ» суттєво стабілізувало технологію розливання і подальшої обробки міді вогневого рафінування, дозволило збільшити швидкість розливання на 25-30 % і забезпечило, при обсязі зливків прямокутного перерізу 1923,3 т/рік, отримання економічного ефекту в сумі 302,1 тис. грн. на рік (частка здобувача). Впровадження нової конструкції кристалізатора і розливного трійника дозволило скоротити кількість поздовжніх тріщин на поверхні зливків в 3-5 разів, що підвищує вихід придатної продукції на 8-12 %. Крім того, нова конструкція кристалізатора дозволила збільшити експлуатаційну стійкість практично в 2,5-3 рази. Результати досліджень міді вогневого рафінування використовуються в навчальному процесі ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» при вивченні курсів «Кольорова металургія» та «Безперервне розливання сталі».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації.

1. Смирнов А.Н. Оценка физико-механических свойств рафинированной меди как материала для рабочих стенок кристаллизаторов МНЛЗ / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, И.В. Шутов, Д.В. Спиридонов // Сб. науч. тр. - Алчевск: ДонГТУ, Вып. 35, 2011. - С.114-123.
2. Смирнов А.Н. Оптимизация содержания фосфора в медных сплавах, используемых для изготовления плит кристаллизаторов МНЛЗ / А.Н. Смирнов, Д.В. Спиридонов, С.В. Куберский, И.В. Шутов // Сб. науч. тр. - Алчевск: ДонГТУ, Вып. 36, 2012.- С.69-76.
3. Грідін С.В. Дослідження явищ усадки при формуванні мідних зливків / С.В. Грідін, Д.В. Спиридонов, Ю.Д. Савенков, О.М. Смірнов // *Металлознавство та обробка металів*. - 2009. - №2.- С.35-39.
4. Смирнов А.Н. Оптимизация параметров кристаллизатора для литья плоских медных слитков на машинах полунепрерывной разливки / А.Н. Смирнов, Д.В. Спиридонов // *Электротехнология*.-2010. - №7.- С.18-21.
(Smirnov A.N. Increasing the Life of Molds for Casting Copper and Its alloys/ A.N.Smironov and D.V.Spiridonov // *Russian Metallurgy (Metally)*. - Vol. 2010. - No. 12.- P.1-4)
5. Смирнов А.Н. Повышение эксплуатационной стойкости кристаллизаторов для разливки меди и ее сплавов / А.Н. Смирнов, Д.В. Спиридонов // *Электротехнология*.-2009. - №12.- С.11-15.
6. Смирнов А.Н. Анализ влияния покрытия кристаллизатора на качество поверхности и свойства слитка/ А.Н. Смирнов, К.А. Гогаев, Д.В. Спиридонов, С.В. Куберский, А.В. Головчанский // Сб. науч. тр. - Алчевск: ДонГТУ, Вып. 38, 2012.- С.123-132.
7. Смирнов А.Н. Влияние конструкции подводящего стакана на формирование слитка при полунепрерывной разливке меди / А.Н. Смирнов, Д.В. Спиридонов, В.А. Головатый, А.П. Верзилов, Д.И. Гойда // *Электротехнология*. - 2013. - №11. - С.22-27.
8. Смирнов А.Н. Конкурентоспособность микро металлургических заводов: Технологические аспекты / А.Н. Смирнов, И.В. Шутов, Д.В. Спиридонов, С.В. Куберский // Сб. науч. тр. - Алчевск: ДонГТУ, Вып. 34, 2011. – С.112-121.
9. Савенков Ю.Д. Рафинирование меди – инновационный путь повышения уровня производства в условиях ОАО «АЗОЦМ» / Ю.Д. Савенков, Д.В. Спиридонов // *Металлы и литье Украины*. – 2009. -№1-2.- С.33-36.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.

10. Спиридонов Д.В. Оптимизация параметров кристаллизатора для литья плоских медных слитков на машинах полунепрерывной разливки / Д.В. Спиридонов, А.Н. Смирнов, Е.Н. Смирнов // «Научно-технический прогресс в металлургии». Тезисы 6-ой международной научно-практической конференции. 3 - 4 ноября 2011г. - Алматы - 2011. - С.88-94.

11. Спиридонов Д.В. Особенности применения огнеупоров при производстве и разливке рафинированной меди / Д.В. Спиридонов, И.В. Шутов, А.П. Верзилов // «Современные огнеупоры: ресурсосбережение и применение в металлургических технологиях» сборник научных трудов XIX - й международной научно-технической конференции. 4 сентября 2013г.- Донецк: «Ноулидж» - 2013. – С.113-121.
12. Спиридонов Д.В. Исследование меди огневого рафинирования как нового конструкционного материала для изготовления теплопроводящих стенок кристаллизаторов МНЛЗ / Д.В. Спиридонов, А.Н. Смирнов // «Современные металлические материалы и технологии». Тезисы докладов 10-й международной научно-технической конференции. 25 – 29 июня 2013г. - Санкт-Петербург, - 2013. - С.244-249.
13. Спиридонов Д.В. Моделирование гидродинамики в кристаллизаторе и оптимизация системы подачи жидкой меди при полунепрерывном литье / Д.В. Спиридонов, А.Н. Смирнов // «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве». Тезисы докладов IV-ой международной научно-технической конференции. 30 сентября – 4 октября 2013г. – Краматорск: ДГМА - 2013. - С.204-205.
14. Смирнов А.Н. /Оптимизация параметров первичного и вторичного охлаждения кристаллизатора прямоугольного сечения для отливки слитков E-Cu57 из рафинированной меди. А.Н. Смирнов, Д.В. Спиридонов // «Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов». Тезисы докладов 10-й Международной научно-практической конференции. 14 ноября 2013г. – Москва: ОАО «Гипроцветмет» - 2013. - С.58-61.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві:

[1] - в результаті комплексного аналізу міді вогневого рафінування показано, що її можливо використовувати як конструкційний матеріал для робочих стінок кристалізаторів; [2] - встановлено вміст фосфору та інших домішок в міді вогневого рафінування, що забезпечують раціональне співвідношення теплопровідності і температури початку рекристалізації; [3] - в результаті досліджень на математичній моделі встановлено вплив основних параметрів розливання на рівень термічних напруг і термоусадку мідного зливка в кристалізаторі прямокутного перерізу; [4] , [10] - запропонована конструкція кристалізатора, що передбачає увігнутість (на 1,5 - 2,5 мм) внутрішньої поверхні пластин широких граней в верхній частині кристалізатора, що сходиться нанівець в нижній, прямокутної його частини; [5] - в ході промислових випробувань кристалізатора з увігнутістю внутрішньої поверхні пластин широких граней у верхній частині кристалізатора встановлено скорочення кількості дефектів на широких гранях зливка; [6] - в результаті комплексного дослідження зливків, відлитих в кристалізатор з експериментальними покриттями, встановлено, що нікелеве покриття покращує якість поверхні зливків з міді вогневого рафінування; [7] - в результаті промислових випробувань різних розподільних трійників встановлено чисельний вплив їх конструкції на конфігурацію фронту твердіння зливків; [8] - в результаті аналізу технологічної побудови ПАТ «АЗОКМ» з позиції металургійних мікро-заводів, визначено, що з піччю вогнево-

го рафінування найкращим чином стикується технологія напівбезперервного лиття зливків; [9] – іспанська технологія вогневого рафінування міді адаптована до хімічного складу брухту міді, що збирається в Україні; [11] - визначено раціональне співвідношення потоків рідкого металу в кристалізаторі; [12] - визначені чисельні значення відмінностей у фізико-механічних властивостях напівфабрикатів з міді вогневого і електролітичного рафінування; [13] - запропоновано варіанти моделювання гідродинаміки рідкої міді, виконана перевірка результатів в промислових умовах; [14] – в результаті вивчення дефекту «поздовжня поверхнева тріщина» встановлені найбільш ймовірні причини його утворення.

АНОТАЦІЯ

Спиридонов Д.В. Развитие теории та усовершенствование технологии напівбезперервного розливання міді вогневого рафінування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». – Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2014.

У дисертації вирішена актуальна науково - технічна задача з розвитку теорії розливання міді вогневого рафінування за рахунок отримання нових закономірностей тепло- і масообмінних процесів, що враховують властивості міді вогневого рафінування, і залежностей, що враховують вплив домішок на величину її електроопору, теплопровідність, температури знеміцнення і початку рекристалізації, а також удосконалення технології розливання міді вогневого рафінування шляхом вибору раціональних конфігурації внутрішньої порожнини кристалізатора та напряду гідродинамічних потоків в лунці рідкого металу.

Технологічні рішення, що розроблені на підставі розвитку теоретичних уявлень про отримання та розливання міді вогневого рафінування і тепломасообмін під час напівбезперервного лиття, забезпечують підвищення стійкості кристалізаторів у 2,5-3 рази та виходу придатного металу на 8-12 %.

Ключові слова: мідь вогневого рафінування, напівбезперервне лиття, піч, злиток, кристалізатор, розподільчий трійник, фронт твердіння, лунка рідкого металу.

АННОТАЦИЯ

Спиридонов Д.В. Развитие теории и усовершенствование технологии полунепрерывной разливки меди огневого рафинирования. – На правах рукописи.

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, 2014.

В условиях отсутствия источников рудного сырья для производства меди электролитического рафинирования, в Украине внедрена инновационная технология получения меди из лома путем огневого рафинирования в отражательной печи. Ввиду того, что отечественный лом имеет в несколько раз большее количество примесей, чем европейский, технология рафинирования и разливки такой меди требует определенных доработок, а полученная по этой технологии медь требует уточнения специфических отличий в физико-механических свойствах от ранее используемой повсеместно меди электролитического рафинирования. Подобные исследования обоснованы тем, что себестоимость меди огневого рафинирования гораздо меньше, чем меди электролитического рафинирования и переход на такую медь в масштабах страны будет иметь значительный экономический эффект.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача развития теории разливки меди огневого рафинирования за счет получения новых закономерностей тепло- и массообменных процессов, учитывающих свойства меди огневого рафинирования, и зависимостей, учитывающих влияние примесей на величину ее электросопротивления, теплопроводность, температуры разупрочнения и начала рекристаллизации, а также усовершенствования технологии разливки меди огневого рафинирования путем выбора рациональных конфигурации внутренней полости кристаллизатора и направления гидродинамических потоков в лунке жидкого металла.

С использованием вновь разработанной методики, выполнены сравнительные исследования физико-механических свойств меди огневого и электролитического рафинирования, таких как относительного удлинение, скручивание до разрушения, электросопротивление, стойкость к окислению в атмосфере воздуха, а так же построены диаграммы наклепа и разупрочнения. Проведенные исследования дают основание утверждать, что медь огневого рафинирования, при гораздо меньшей себестоимости, в большинстве случаев является адекватной заменой меди электролитического рафинирования. В результате исследований установлена зависимость электросопротивления меди огневого рафинирования от химического состава расплава:

$\rho = 0,01705 + 0,00233 \text{ Sn} + 0,006355 \text{ Ni} - 0,00129 \text{ Ag}, \times 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м.}$, которая позволяет управлять процессом рафинирования, с целью достижения заданных показателей по электросопротивлению готовой продукции.

В ходе проведенных исследований применительно к рафинированной меди установлено, что теплопроводность в интервале 370-400 Вт/м•К, температура разупрочнения 410-440 °С, и температура начала рекристаллизации 370-400 °С обеспечивается при содержании фосфора в сплаве 40-120 ppm. Указанные параметры выгодно отличаются от показателей известных марок меди и низколегированных медных сплавов.

Взаимодействие меди с различными покрытиями изучали на физической модели кристаллизатора прямоугольного сечения. Одна пара противоположных стенок модели не имела защитного покрытия, а на две другие методом высокоскоростного воздушно-топливного напыления были нанесены слой Ni и Ni-Cr покрытия соответственно. В кристаллизатор заливали жидкую медь с температурой 1133 °С. После затвердевания слиток извлекали и изучали качество поверхностно-

го и подповерхностного слоев, а так же их твердость. Показано, что никелевое и никель-хромовое покрытия, нанесенные методом высокоскоростного воздушно-топливного напыления, обеспечивают повышение качества поверхности слитка, в том числе предотвращают появление волнистости и складок. Это связано с уменьшением угла смачивания поверхности стенок изложницы заливаемым металлом, а также со снижением интенсивности теплоотвода через них.

С помощью созданной установки для физического моделирования выполнены исследования, позволяющие не только визуализировать отдельные стадии движения жидкого металла в процессе литья и затвердевания, но так же выполнять сравнительные качественные оценки параметров процесса при использовании распределительных тройников различных конструкций. Результаты моделирования потоков сопоставлялись с результатами работ по определению конфигурации фронта затвердевания в промышленных условиях, выполненных методом заливки свинца. Для этого в конце розливки слитка в кристаллизатор заливали 2 кг жидкого свинца, подогретого до температуры 400 °С, который, в силу более высокой плотности, стекал вниз к границе фронта затвердевания. Конфигурацию лунки определяли на продольных сечениях, вырезанных из слитков параллельно узкой грани. Разработанная на основании выполненных исследований конструкция литниковой системы создает рациональное соотношение потоков, при котором обеспечивается необходимый подогрев верхней части жидкой лунки, а в нижней ее части жидкостные струи перемешивают жидкую ванну, не оказывая влияние на формирование твердой фазы.

В развитие выполненных исследований, для условий ПАО «АЗОЦМ» разработана и внедрена новая конструкция кристаллизатора, в которой предусмотрена вогнутость стенок в верхней части кристаллизатора величиной 1,5-2,5 мм, на величину 0,7-0,8 высоты, сходящая на нет в нижней, прямоугольной его части, что препятствует формированию лоцины (ужимины) по широким граням слитка. Внедрение новой конструкции кристаллизатора и разливочного тройника позволило сократить количество продольных трещин на поверхности слитков в 3-5 раз, что повышает выход годной продукции на 8-12 %. Кроме того, новая конструкция кристаллизатора позволила увеличить их эксплуатационную стойкость практически в 2,5-3 раза.

Внедрение приведенных разработок в производстве ПАО «АЗОЦМ» существенно стабилизировало технологию разливки и дальнейшей обработки меди огневого рафинирования и обеспечило получение годового экономического эффекта в сумме 302,1 тыс. грн (доля соискателя).

Ключевые слова: медь огневого рафинирования, полунепрерывное литье, печь, слиток, кристаллизатор, распределительный тройник, фронт затвердевания, трещины, лунка жидкого металла.

ABSTRACT

Spipidonov D.V. The development of the theory and improvement technologies of semi continuous casting for fire-refined copper. – The Manuscript.

Dissertation for the candidate of technical sciences degree, specialty 05.16.02 - Ferrous and non-ferrous metals and special alloys . - State Higher Scientific Institution "Donetsk National Technical University ", Donetsk, 2014.

The thesis solved an actual scientific and technical task of the theory of casting copper fire refining by gaining new regularities of heat and mass transfer processes that take into account the properties of the copper fire refining , and dependencies that take into account the influence of impurities on the value of its electrical resistivity , thermal conductivity, temperature loss of strength and the onset of recrystallization , as well as improvements in technology casting copper fire refining rational configuration by selecting the internal cavity of the mold and the direction of hydrodynamic flow in the well of the liquid metal .

Developed on the basis of theoretical concepts of copper fire refining and mass exchange during semicontinuous casting technology solutions provide increased resistance crystallizer 2.5 - 3 times and out of metal by 8-12 %.

Keywords: fire-refined copper, semicontinuous casting, furnace, ingots, mold, distribution tee, solidification front, cracks, hole liquid metal.