

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКА ДЕРЖАВНА ІНЖЕНЕРНА АКАДЕМІЯ

**Єрмарченко Юлія Анатоліївна**

УДК 669.14.018.583 : 669.18.04

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ  
ТРАНСФОРМАТОРНОЇ СТАЛІ  
В КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОМУ ПРОЦЕСІ**

Спеціальність 8.09040101 “Металургія чорних металів”

**Автореферат**  
кваліфікаційної роботи магістра

Запоріжжя - 2016

Робота є рукопис.

Робота виконана на кафедрі металургії чорних металів Запорізької державної інженерної академії Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

Кандидат технічних наук, доцент Кириченко О.Г.

Рецензент:

Начальник технічного управління

ПАТ “Запоріжсталь”, к.т.н. Набока В.І.

Захист кваліфікаційної магістерської роботи відбудеться “11” січня 2016 р. в 9<sup>00</sup> в аудиторії 225 на засіданні Державної екзаменаційної комісії в Запорізькій державній інженерній академії за адресою: 69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** Сучасний етап розвитку вітчизняної металургійної промисловості характеризується вдосконаленням технологічних процесів з метою підвищення якості та розширення сортаменту металопродукції відповідно до вимог ринкової економіки. Після введення в експлуатацію киснево-конвертерного цеху, що має сучасні технологічні агрегати, у підприємства з'являється можливість виходу на світовий ринок з новими видами металопродукції, що користується підвищеним попитом. Одним із видів такої металопродукції є анізотропна трансформаторна сталь.

Електротехнічні сталі є основним класом магнітном'яких матеріалів, які використовуються у машинобудуванні й трансформаторобудуванні. Широке застосування електротехнічних сталей в цій області техніки обумовлено високим рівнем магнітних властивостей і відносно низькою вартістю в порівнянні з іншими магнітном'якими матеріалами.

При безперервному розвитку техніки, швидкому збільшенні виробництва електроенергії значно розширюється область застосування електротехнічної сталі. Сама технологія виробництва електротехнічної сталі значно змінилася. Рулонна холоднокатана текстурована і нетекстурована домінує над листовою гарячекатаною сталлю. Створені та проектується нові марки сталі з поліпшеними магнітними властивостями.

Високі магнітні властивості готової електротехнічної анізотропної сталі, забезпечуються наявністю в сталі досконалої кристалографічної текстури (110) [001] (реброва текстура, текстура Госса), яка формується в процесі вторинної рекристалізації при високотемпературному відпалі. Для протікання вторинної рекристалізації необхідно, по-перше, створення вже під час гарячої прокатки сталі певної структурної та текстурної неоднорідності і, по-друге, наявність в металі дисперсних частинок інгібіторної фази.

Отримання необхідної кристалографічної текстури в електротехнічній анізотропній сталі, досягається за допомогою реалізації механізму структурної спадковості. Інгібіторна фаза затримує нормальний ріст зерен, дозволяючи реалізуватися процесу вторинної рекристалізації.

В даний час існує три основні варіанти виробництва електротехнічної анізотропної сталі: сульфідний, нітридний, сульфанітридний. Ці варіанти відрізняються хімічними складами і режимами обробки.

Сульфідний варіант найпоширеніший. Інгібіторною фазою в даній сталі є сульфід марганцю. Основними технологічними операціями при виробництві сталі, по сульфідному варіанту є обмеження концентрації марганцю, високотемпературний нагрів перед гарячою прокаткою, гаряча прокатка, дві холодні прокатки, розділені рекристалізаційним випалом. Кінцева десульфурація металу до вмісту сірки 0,002% виконується при високотемпературному відпалі. Готова сталь має магнітну індукцію в полі 800 А/м - 1,81 - 1,84 Тл.

Сталь нітридного варіанту має підвищений вміст вуглецю, азоту і міді. Інгібіторною фазою є нітрид алюмінію. Основні операції після гарячої прокатки - перша холодна прокатка, друга холодна прокатка і високотемпературний відпал. Магнітна індукція в полі 800 А/м - 1,85 - 1,89 Тл. При цьому способі вміст азоту в сталі, коливається в межах 0,006 - 0,010%, алюмінію 0,010 - 0,020%, а вміст сірки, кисню та

інших домішок має бути мінімальним (близько 0,002 - 0,003%). Істотною відмінністю сталі нітридна варіанту від сульфидного є більш низький нагрів металу перед гарячою прокаткою: (1250 °С, проти 1400 °С).

Сталь сульфонітридного варіанту має підвищений вміст (у порівнянні з сульфідними) вуглецю і алюмінію. Основні операції після гарячої прокатки - нормалізація, однократна холодна прокатка, зневуглецьовуючого випалу і високотемпературний відпал. Магнітні індукції в полі 800 А/м - 1,89 - 1,94 Тл - є найвищими для готової сталі, що забезпечується за рахунок формування надщільної дисперсної інгібіторної фази в процесі термообробок (а не під час гарячої прокатки) і потужного силового впливу на текстуру сталі, якою є однократна прокатка. Принципово важливим у даній технології є наявність високотемпературного нормалізуючого відпалу (1120 °С - 1150 °С) з жорстко регламентованим режимом охолодження.

Виробництво холоднокатаної електротехнічної анізотропної сталі набуває все більшого поширення за кордоном. У великих кількостях холоднокатана сталь виробляється в США, Великобританії, ФРН, Франції, Японії, Швеції та Росії.

З електротехнічної анізотропної сталі роблять сердечники для трансформаторів. Сердечники піддаються перемагнічуванню змінними струмами. Виготовлення сердечників з добре текстурованих сталей дозволяє скоротити габарити і вагу трансформаторів, підвищити їх коефіцієнт корисної дії.

Підвищення якості сталі, пов'язано, насамперед, зі зменшенням загальних питомих втрат. Щоб зменшити ці втрати деталі машин і трансформаторів виготовляють з тонких листів товщиною від 0,15 до 0,35 мм. Ці листи мають електроізоляційну оболонку. Застосовують різні типи ізоляцій на поверхні анізотропних електротехнічних сталей.

Електроізоляційне покриття наноситься з метою поліпшення магнітних характеристик сталі, зменшення загальних питомих втрат в сталі, зниження шуму в сердечниках трансформаторів великої потужності і розмірів.

З метою більш раціонального використання електротехнічної анізотропної сталі, механізації, та автоматизації технологічних процесів виготовлення трансформаторів потрібно, щоб сталь вироблялася у вигляді стрічки. Зважаючи на це електротехнічна промисловість вимагає поставляти сталь у вигляді стрічки. Введення нового, більш сучасного обладнання, а також вдосконалення технології виплавки сталі, і інших заходів сприяє, значного поліпшення якості анізотропної електротехнічної сталі.

Таким чином, у магістерській роботі був розроблений прогресивний нітридний варіант виробництва трансформаторного листа, що має текстуру, що забезпечує світовий рівень споживчих властивостей. Для реалізації цієї технології знадобився метал, хімічний склад якого дещо відрізняється від хімічного складу традиційної трансформаторної сталі. Тому розробка технології одержання в умовах киснево-конвертерного цеху металу, придатного для виробництва анізотропної трансформаторної сталі по нітридному варіанту була актуальним завданням.

**Мета роботи.** Обґрунтування комплексу технологічних процесів і режимів їх проведення, що забезпечують стабільне отримання в киснево-конвертерному цеху з агрегатами великої місткості металу для виробництва анізотропної трансформаторної сталі.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан і напрями виробництва трансформаторної сталі.
2. Розглянути вимоги, що пред'являються до електротехнічних анізотропних сталей.
3. Дослідити магнітні властивості електротехнічних сталей та їх зв'язок з технологією виробництва.
4. Дослідити формування структури і текстури анізотропної електротехнічної сталі.
5. Провести лабораторні і промислові дослідження по вибору найбільш оптимальної технології виплавки, позапічної обробки, розливки та прокатки електротехнічної сталі.

**Об'єкт дослідження:** процес виробництва електротехнічної анізотропної сталі в умовах киснево-конвертерного цеху.

**Предмет досліджень:** закономірності і механізми послідовних етапів виробництва трансформаторної сталі в конвертерному процесі та їх вплив на якість кінцевого продукту.

**Методи досліджень:** металографія, петрографічний, хімічний та мікроскопічний аналізи, електротехнічні вимірювання.

**Наукова новизна:**

1. Сформульовано основні наукові положення щодо комплексного впливу легуючих елементів на властивості електротехнічної анізотропної сталі, а саме високу магнітну проникненість і низькі ватні втрати.
2. Розкрито закономірності засвоєння азоту сталевую ванною задля отримання високого вмісту при використанні різноманітних азотовмісних компонентів.
3. Встановлено, що трансформаторна сталь схильна до утворення газових міхурів в процесі кристалізації, що знижує механічну міцність твердіючої оболонки безперервнолитих слябів. Утворенню газових міхурів сприяють підвищений вміст водню і азоту в трансформаторній сталі.

**Практичне значення:**

1. Розроблена двохстадійна технологія конвертерної плавки з проміжним видаленням частини шлаку, яке здійснюється при зниженні вмісту вуглецю до 0,10 - 0,20%.
2. Випробувані різні способи легування металу азотом. Найбільш ефективним виявилось введення в ківш при випуску плавки деякої кількості азотованого феросиліцію. Замість азотованого феросиліцію можна використовувати і азотований ферохром.
3. Запропонована технологія продувки металу аргоном в сталерозливних ковшах через пористі пробки, встановлені в днищі сталерозливного ковша, а також забезпечення якісного відсічення конвертерного шлаку.
4. Розроблений складний порядок розкислення і легування під час випуску плавки з застосуванням алюмінію, феросиліцію, азотованих феросплавів, міді, вапна.
5. Для зниження надлишкового вмісту водню в число операцій ковшової обробки ввели вакуумування металу на установці циркуляційного типу.
6. Для вирішення проблеми аварійних проривів розроблено особливий температурно-швидкісний режим розливання трансформаторної сталі, нові шлакоутворюючі суміші, особливий режим вторинного охолодження слябів, а також спеціаль-

ні заходи щодо зниження вмісту водню в металі.

**Апробація результатів роботи.** Результати досліджень, включених в кваліфікаційну магістерську роботу, доповіли на: XX науково-технічній конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА. *Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості. Том I.* (Запоріжжя, 2015 р.); наукових семінарах кафедри металургії чорних металів Запорізької державної інженерної академії.

### Публікації

Основні результати роботи викладені в збірці магістерських робіт і тезах конференції.

### Структура і об'єм роботи

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 32 найменувань, викладена на 98 сторінках машинописного тексту, включаючи 36 рисунків, 16 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, показано наукову новизну роботи і практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** приведена загальна характеристика і аналіз технологічних процесів виробництва трансформаторних сталей; розглянуті вимоги, що до них пред'являються; магнітні властивості електротехнічних сталей та умови формування структури і текстури анізотропної електротехнічної сталі.

У першому розділі на основі аналізу літератури розглядаються споживчі властивості (магнітна проникність і питомі ватні втрати при перемагнічуванні) трансформаторної сталі, їх фізична природа і способи отримання. Показано, що для забезпечення потрібного комплексу споживчих і технологічних властивостей трансформаторної сталі, потрібно метал з низьким (0,02 - 0,03%) вмістом вуглецю і досить високим (3 - 4%) вмістом кремнію. Потрібні електротехнічні властивості трансформаторної сталі досягаються після холодної прокатки металу на лист необхідної товщини в результаті спеціальної термічної обробки, в ході якої відбувається певна зміна хімічного складу оброблюваного металу.

Основні світові виробники трансформаторної сталі (рис. 1) створюють потрібний комплекс споживчих властивостей готового металу по так званому сульфідному варіанту технології.

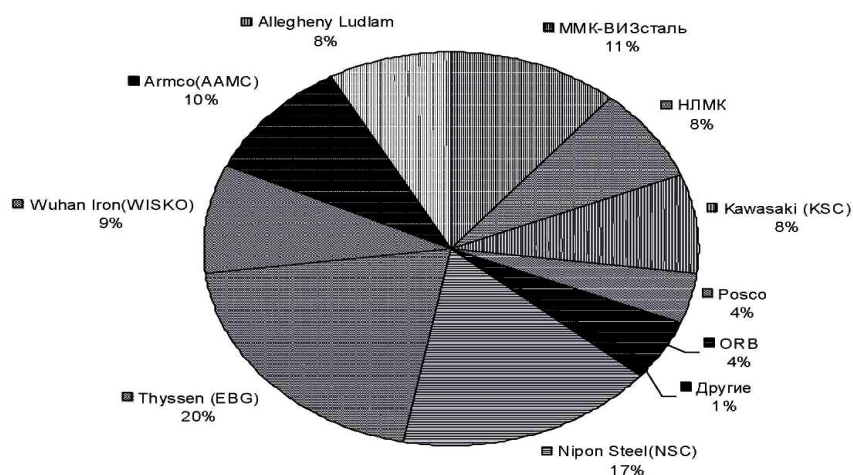


Рисунок 1 – Структура світового виробництва трансформаторної сталі

У роботі розроблено ефективний варіант нітридної технології, для реалізації якого на етапі виплавки потрібно одержати метал з досить високим вмістом азоту.

На основі огляду літератури на початковому етапі даного дослідження було поставлено завдання розробки технології виплавки в киснево-конвертерному цеху трансформаторної сталі, що містить: 0,025 ... 0,040% С; 2,90 ... 3,20% Si; 0,15 ... 0,30% Mn; 0,40 ... 0,55% Cu; 0,013 ... 0,017% Al і не менш 0,010 ... 0,013% N. Вміст інших елементів (сірки, фосфору, хрому і нікелю) передбачалося мати на звичайному для цеху рівні.

Для оцінки втрат електроенергії, що мають місце при роботі трансформаторів і електричних машин, електротехнічні сталі характеризуються рівнем питомих магнітних втрат (кількістю ват на 1 кг маси сталі) – одним з основних показників якості електротехнічних сталей (рис. 2). Питомі магнітні втрати складаються з втрат на вихрові струми, гістерезисні й додаткові втрати.

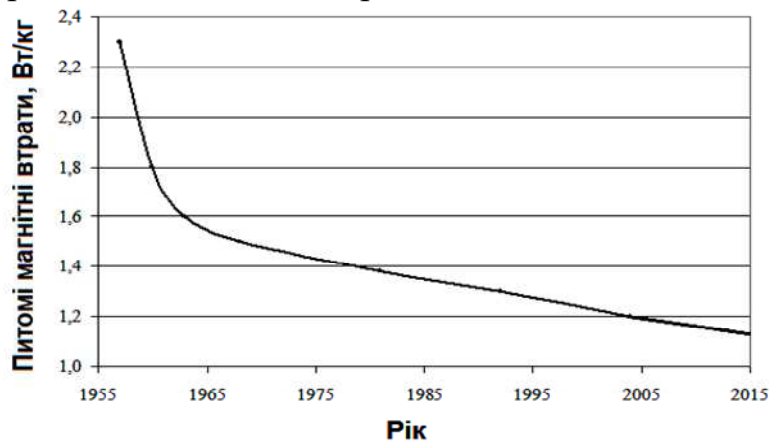


Рисунок 2 – Основні етапи розвитку і вдосконалення виробництва в трансформаторобудуванні

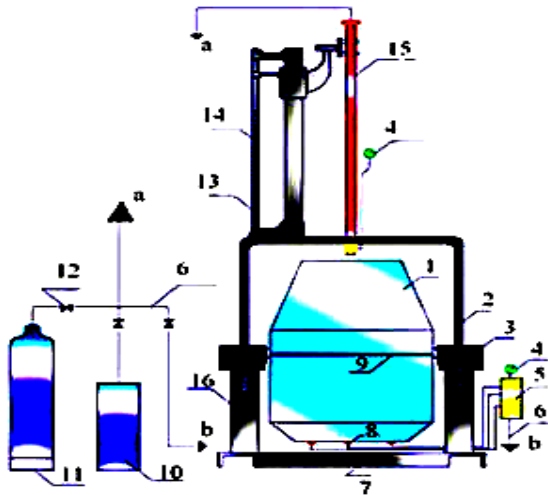
Вироби з електротехнічної сталі, працюють в змінних магнітних полях, отже, генеруються вихрові струми. Вони піддаються швидкому перемагнічуванню. Одним з основних вимог, що пред'являються до електротехнічних сталей, є мінімальна величина втрат потужності на збудження вихрових струмів і підмагнічування, віднесена до одиниці маси сталі – це ватні втрати або питомі втрати. Властивості сталі, визначаються величиною і формою зерен, текстурою, які залежать від хімічного складу металу, від величини обтиснень при холодній та гарячій прокатці та термообробці. У електротехнічній анізотропній сталі велика величина магнітної проникності.

При виготовленні трансформаторів важливе значення мають вплив легуючих елементів на властивості електротехнічної анізотропної сталі: кремній, вуглець, хром, марганець, нікель, мідь, фосфор, сірка, алюміній, титан, кисень, водень, азот.

У другому розділі розроблена і досліджена технології виплавки і розливання трансформаторної сталі; розглянута технологія плавки і позапічної обробки; досліджена технологія ковшової обробки та особливості розливання трансформаторної сталі, а також розглянуті дефекти і причини аварій при розливанні.

Лабораторні експерименти виконані на фізичній моделі конвертера. Також в роботі використовувався великий обсяг експериментального матеріалу з діючого виробництва трансформаторних сталей.

Дослідження виконано на прозорій моделі 160 т конвертера. Масштаб моделі становив 1: 6 (рис. 3).



1 - посудина (органічне скло), 2 - опора фурми, 3 - цапфи, 4 - манометр, 5 - колектор, 6 - магістраль, 7 - опора установки, 8 - донні продувальні елементи, 9 - опорне кільце, 10 - компресор, 11 - балон, 12 - кран, 13 - напрямна фурми, 14 - лінійка, 15 - фурма, 16 - стійка, 17 - програмне забезпечення

Рисунок 3 – Загальний і схематичний вид лабораторної установки

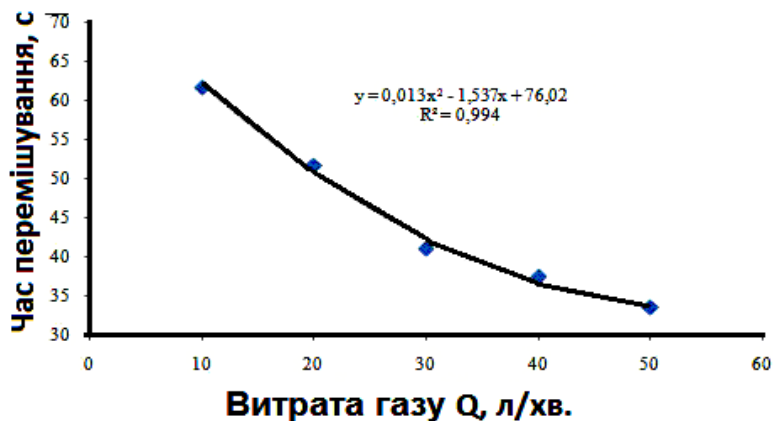
За допомогою обробки отриманих експериментальних даних було встановлено, що вісім донних продувних пристроїв розташованих на відстані  $0,75R$  від центру днища, з витратою продувочного газу 50 л/хв забезпечують найкраще час усереднення металу в процесі конвертації (табл. 1, рис. 4).

Таблиця 1 – Експериментальне значення положення донних фурм при різних витратах дуття

Витрата газу, Q (л/хв.)	10	20	30	40	50
Місце встановлення донних фурм (експериментальні значення), $1/R$	0,748	0,754	0,750	0,743	0,745

Саме таке «оптимальне» положення донних фурм -  $0,75R$  було вибрано як «відправна точка» для подальших досліджень.

Конструкція фурми дозволяла застосовувати змінні наконечники. Загальний вигляд змінних наконечників представлений на рисунку 5.



а)

б)

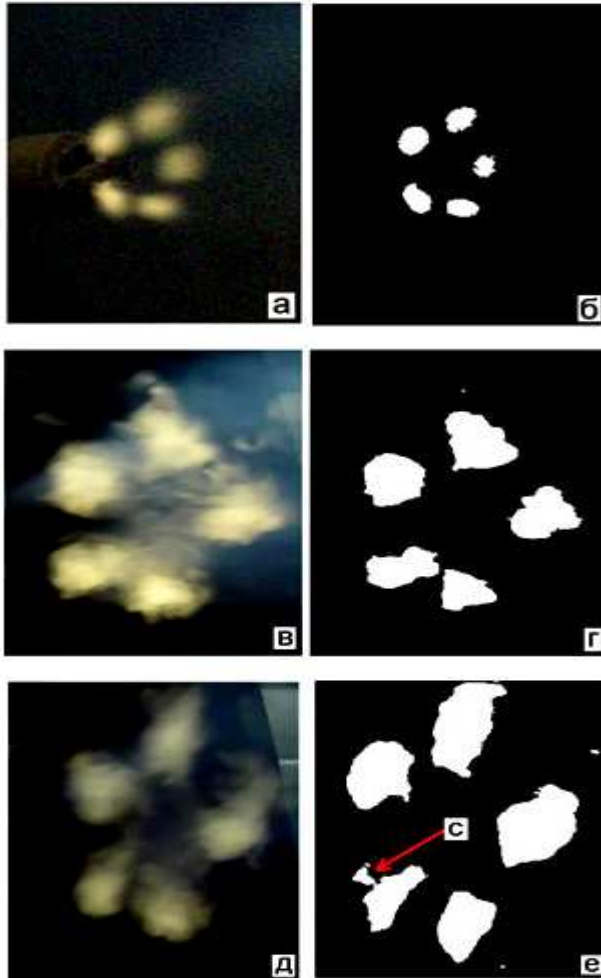
а) - циліндричні сопла, б) - сопла Лавалья

Рисунок 4 – Залежність мінімального часу перемішування від витрати дуття

Рисунок 5 – Типи наконечників для верхньої продувки

Характеристика реакційної зони при переміщенні фурми на відстань 50, 100, 150 мм від вертикальної поверхні ванни представлені на рисунку 2.4.





а - 50мм; в - 50мм; д - 100мм (загальний вигляд);  
б, г, е - ядро струменя

Рисунок 6 – Вплив відстані від зрізу фурми на характер струменя

Основною особливістю трансформаторної сталі, що виплавляється в ККЦ, є досить високий регламентований вміст азоту, отримання якого - досить складне завдання. На стадії освоєння технології виплавки трансформаторної сталі було випробувано кілька способів отримання в металі необхідного вмісту азоту:

- продування металу газоподібним азотом на агрегаті доведення сталі;
- введення в ківш карбаміду в кількості 0,4 - 0,7 кг/т сталі при зливці металу з конвертера;
- введення при зливці металу в ківш азотованого ферохрому марки ФХН - 1, що містить близько 6% азоту.

На рис. 7-12 наведені дані заводу-споживача трансформаторної сталі про вплив вмісту найбільш важливих елементів та факторів на магнітну індукцію при напруженості магнітного поля 800 А/м ( $B_{800}$ ) і питомі ватні втрати при перемагнічуванні з частотою струму 50 Гц і максимальному значенні магнітної індукції 1,7 Тл ( $P_{1,7/50}$ ) для листів товщиною 0,30 мм.

Вже на початковому етапі розробки технології виплавки трансформаторної сталі було ясно, що в умовах киснево-конвертерного цеху можна реалізувати тільки один варіант легування металу кремнієм - введення феросиліцію в сталерозливний ківш при зливці металу з конвертера.

Представлені результати відносяться до фурми з п'ятьма соплами Лаваля рівномірно розташовані по торцевій площі наконечника. Сопла мали нахил до вертикальної осі фурми 14 градусів. Діаметр дифузора і конфузора складала: 7,2 і 6,6 відповідно.

Виробництво трансформаторної сталі в киснево-конвертерному цеху передбачає проведення наступних основних технологічних процесів:

- виплавку сталі в кисневому конвертері;
- легування металу кремнієм і попереднє розкислення алюмінієм при зливці з конвертера в сталерозливний ківш;
- дегазацію металу на установці циркуляційного вакуумування;
- легування азотом і доведення за хімічним складом і температурі на агрегаті доведення сталі або установці «під - ківш»;
- розливу сталі методом «плавка на плавку» на МБЛЗ з криволінійною технологічною віссю.

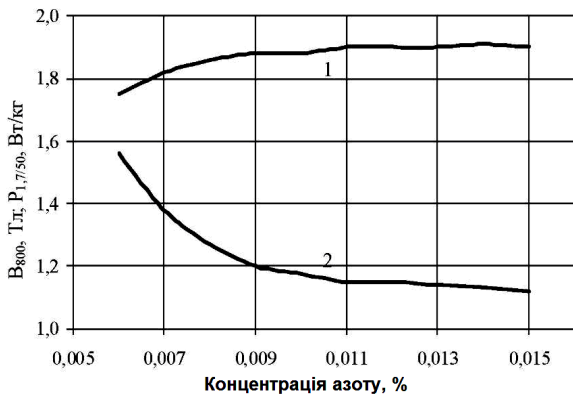


Рисунок 7 - Вплив концентрації азоту в металі на магнітну індукцію (1) і питомі ватні втрати (2)

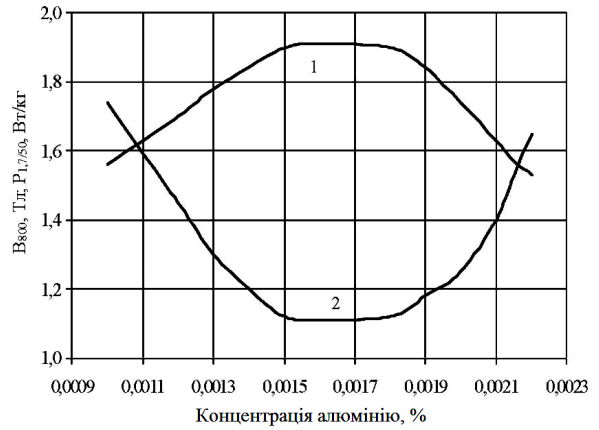


Рисунок 8 – Вплив концентрації алюмінію в сталі на магнітну індукцію (1) і питомі ватні втрати (2)

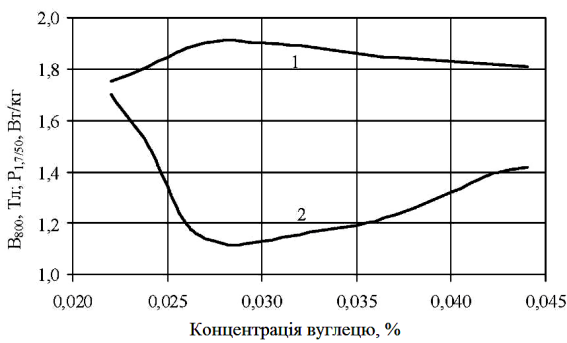


Рисунок 9 – Вплив концентрації вуглецю в сталі на магнітну індукцію (1) і питомі ватні втрати (2)

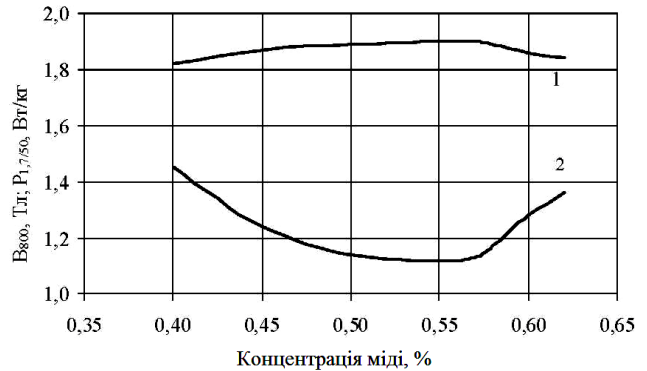


Рисунок 10 – Вплив концентрації міді в сталі на магнітну індукцію (1) і питомі ватні втрати (2)

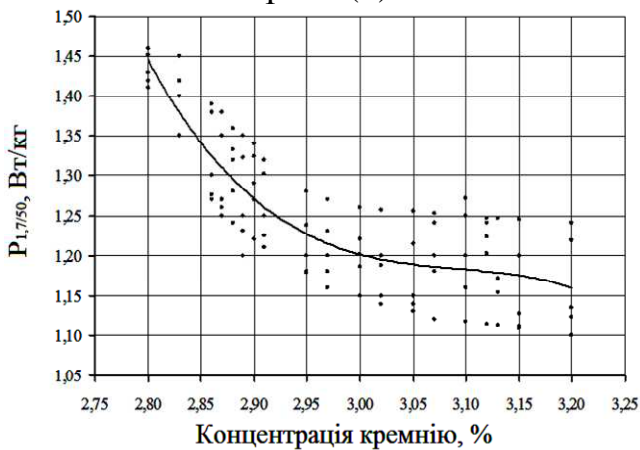


Рисунок 11 – Вплив вмісту кремнію на питомі магнітні втрати сталі



Рисунок 12 - Вплив вмісту сірки на магнітні властивості сталі

Тому головним завданням розроблюваної технології конвертерної плавки було отримання в кінці продувки металу, що містить приблизно 0,03% С. При продуванні металу з низьким вмістом вуглецю швидко зростає вміст оксидів заліза в шлаку (рисунок 13), що веде до додаткової втрати заліза і робить нестабільним засвоєння кремнію при легуванні сталі.

Моделювання показало також, що проміжне видалення частини шлаку практично не впливає на залишковий вміст сірки і фосфору.

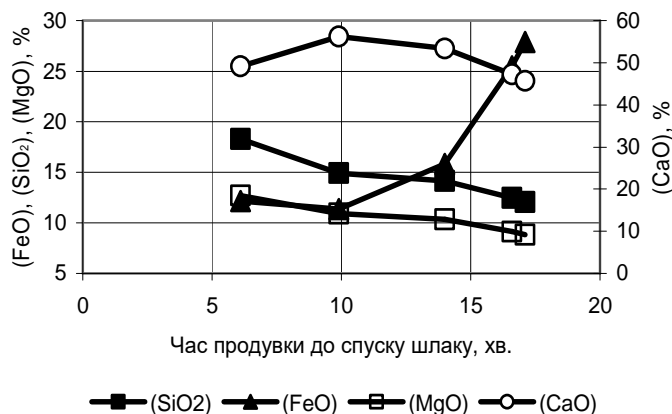


Рисунок 13 – Зміна вмісту компонентів шлаку при проведенні однієї з дослідних плавок

На початковій стадії роботи прагнули отримати метал, який містить 0,012 - 0,014% азоту. Були випробувані різні методи легування металу цим елементом:

- введення при зливі метал в ківш карбаміду (сечовини) в кількості 0,4 - 0,7 кг/т сталі;
- введення при зливі метал в ківш азотованого ферохрому марки ФХН - 1 (вміст азоту ~ 6%) у кількості, що гарантує отримання у готовій сталі хрому не більше 0,30%;
- продування металу азотом на агрегаті доведення сталі.

Всі ці способи легування металу азотом дозволяли (з різним ступенем надійності) отримувати необхідний вміст цього елемента. Однак при розливанні перших дослідних плавок трансформаторної сталі часто відбувалися аварійні прориви металу. У затверділій оболонці, що залишилася після витікання рідкого металу, зазвичай виявлялися великі газові бульбашки. Підвищену аварійність при розливанні трансформаторної сталі пов'язали з підвищеним вмістом газів - як азоту, так і водню. Вплив способу введення азоту на технологічні параметри розливання представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Вплив способу азотування трансформаторної сталі на показники розливання

Спосіб азотування	Кількість плавок	Розлито плавок, шт. /%	
		з проривами	з підвисаннями
Без додаткового азотування	16	1 / 6,2	1 / 6,2
Азотованим ферохромом	26	1 / 3,8	1 / 3,8
Карбамідом	40	4 / 10,0	9 / 22,5
Продувкою азотом на АДС	107	2 / 1,9	10 / 9,3

Дані таблиці 2 показують, що кращі результати виходять при використанні азотованого ферохрому. З урахуванням цієї обставини надалі розробили технологію легування металу азотом з використанням азотованого феросиліцію. Одночасно нижня межа допустимого вмісту азоту була знижена до 0,009%.

При розливанні вміст азоту в металі підвищується в середньому на 0,001%. Частотний розподіл вмісту азоту в металі на МБЛЗ представлено на рисунок 2.13. Як випливає з цього рисунка, в переважній більшості випадків забезпечується необхідний вміст азоту. В умовах досить високого вмісту азоту усунути утворення газових міхурів при розливанні трансформаторної сталі можна шляхом істотного зни-

ження вмісту водню в металі, що розливається. Для вирішення цього завдання в число операцій ковшової обробки ввели вакуумування металу на установці циркуляційного типу. При досить низькому залишковому тиску у вакуумній камері вдається знизити вміст водню в металі на 1 ppm і більше (рис. 14-18).

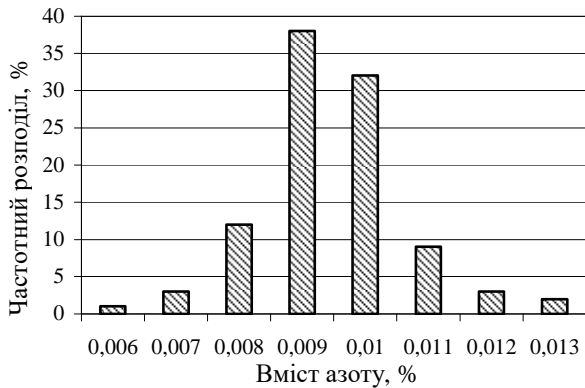


Рисунок 14 – Частотний розподіл вмісту азоту на МБЛЗ

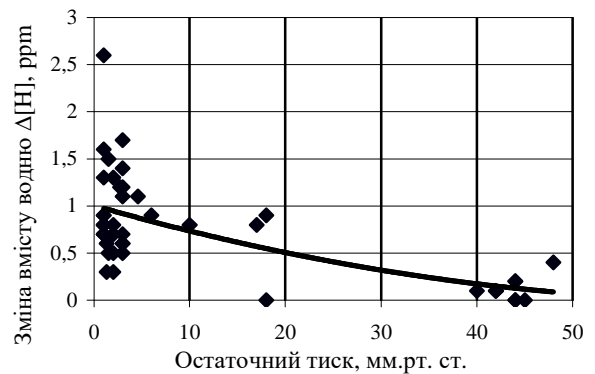


Рисунок 15 – Зниження вмісту водню при вакуумування трансформаторної сталі

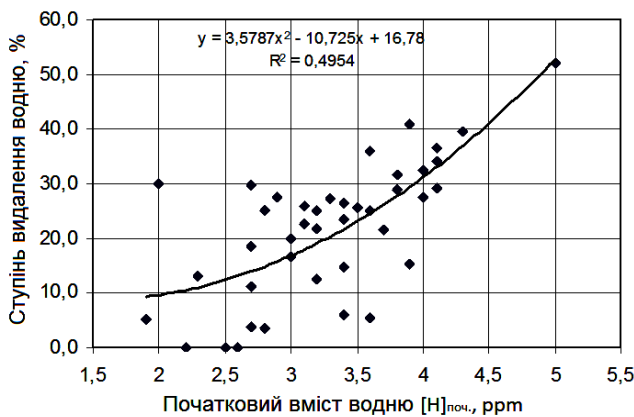


Рисунок 16 – Вплив початкового вмісту водню на ступінь його видалення

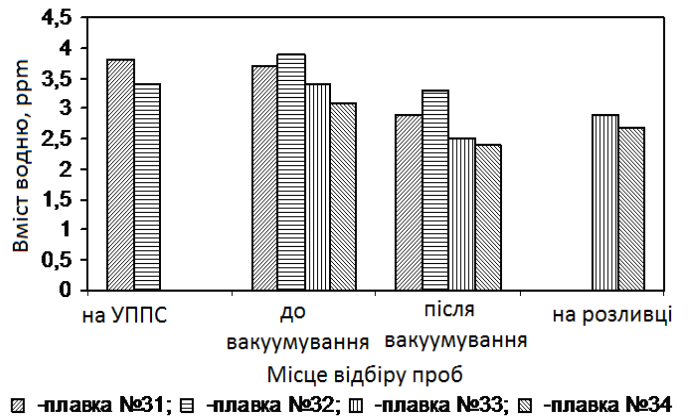


Рисунок 17 – Вміст водню на різних стадіях

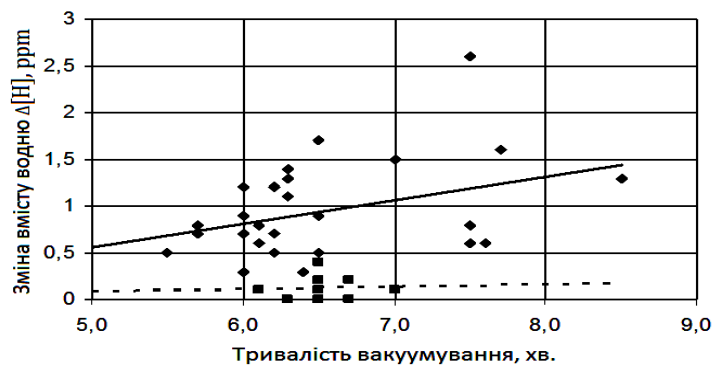


Рисунок 18 – Вплив тривалості вакуумування на зміну концентрації водню в сталі

Розливання трансформаторної сталі здійснюється на чотирьохструмкових МБЛЗ з криволінійною технологічної віссю. Аварійні прориви металу є найбільш болючою проблемою виробництва трансформаторної сталі. Частота їх появи в період освоєння виробництва трансформаторної сталі була на один - два порядки вище, ніж при розливанні сталі всіх інших марок. Як вже зазначалося раніше, аварійні прориви металу були також тісно пов'язані з утворенням при кристалізації металу газових міхурів. Для вирішення проблеми аварійних проривів довелося розробити особливий температурно-швидкісний режим розливання трансформаторної сталі,

нові шлакоутворюючі суміші, особливий режим вторинного охолодження слябів, а також вжити спеціальних заходів щодо зниження вмісту водню в металі.

Використання раціонального температурно-швидкісного режиму, легкоплавкої шлакоутворюючої суміші і м'якого режиму охолодження слябів після виходу з кристалізатора дозволило істотно зменшити частоту аварійних проривів металу при розливанні трансформаторної сталі (рис. 19).

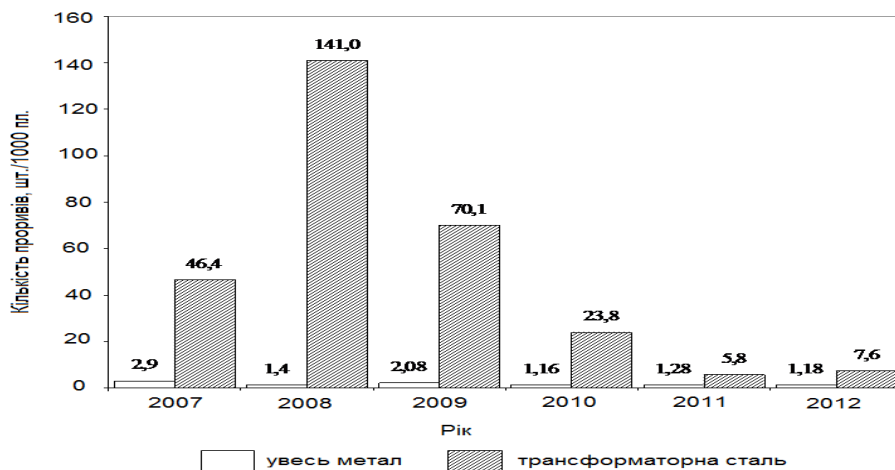


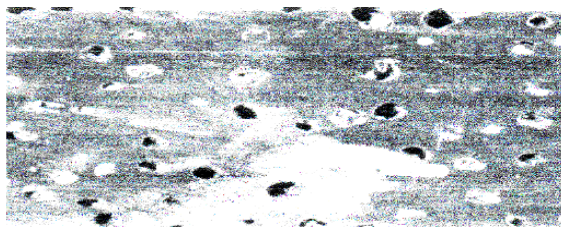
Рисунок 19 – Зміна кількості аварійних проривів металу в киснево-конверторному цеху в період 2007...2012 рр.

При аналізі причин аварійності розливання трансформаторної сталі (розливання з проривами зливка) важливе значення має хімічний склад рідкої сталі, так як фізико-механічні властивості металу багато в чому визначаються присутніми в ньому елементами, їх властивостями і кількістю.

При азотуванні трансформаторної сталі карбамідом були часті випадки появи дефекту «газовий міхур» в безперервнолитому слябі, на ряді плавок «прориви» скоринки злитка під час розливання, а на багатьох підвисання злитка. Огляд темплетів і кірочок слябів проривних плавок показав наявність в металі газових міхурів різних по діаметру і довжині (рис. 20, 21).



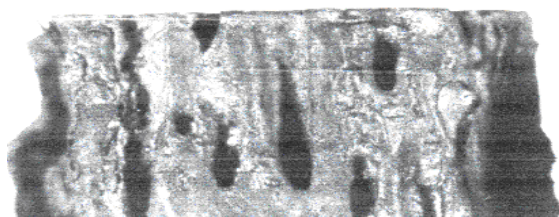
а



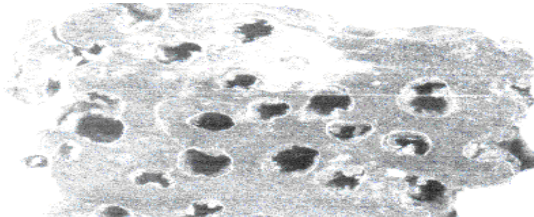
б

а – вид по товщині сляба; б – вид зверху

Рисунок 20 – Дрібні газові бульбашки в безперервно литих слябах трансформаторної сталі



а



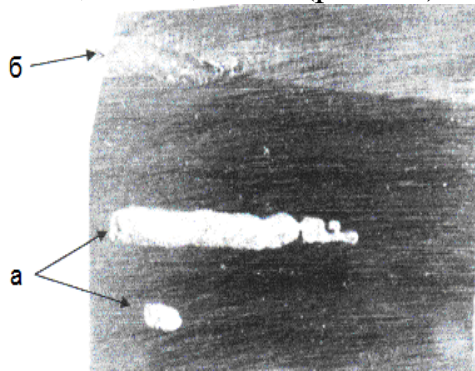
б

а – вид по товщині сляба; б – вид зверху

Рисунок 21 – Загальний вигляд великих газових міхурів в темплеті безперервно литих слябів

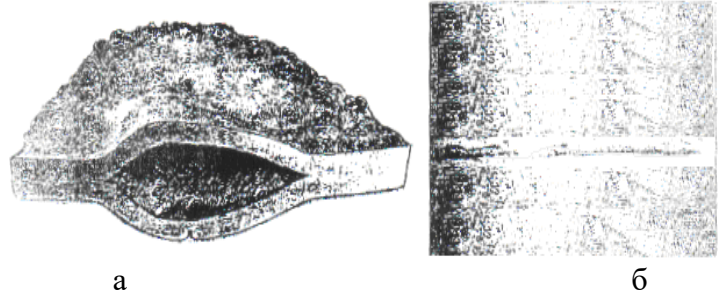


Бульбашки, що мають вихід на поверхню сляба, тобто сполучені з атмосферою, мають окислену поверхню, а у міхурів, що не мають виходу, поверхня не окислена - блискуча (рис. 22). У процесі виробництва листа з анізотропної сталі також виникає дефект «міхур - здуття», який проявляється, як в проміжній гарячекатаній заготівлі товщиною 24 мм, так і в холоднокатаному трансформаторному листі товщиною 0,30 ... 0,50 мм (рис. 23).



а - внутрішня, поверхня бульки не окислена; б - виходить назовні, поверхня міхура окислена - темна

Рисунок 22 - Бульбашки в металі



а - в гарячекатаному листі; б - в холоднокатаному листі

Рисунок 23 - «Пузир - здуття»

Таким чином, можна підсумувати:

1. Основною причиною високої частоти аварійних проривів металу при розливанні трансформаторної сталі є поєднання низької механічної міцності з недостатньою пластичністю легованої кремнієм сталі при температурі 1200 °С і вище.

2. Трансформаторна сталь схильна до утворення газових міхурів в процесі кристалізації, що знижує механічну міцність твердіючої оболонки безперервнолитих слябів і створює умови для аварійного витікання металу через тріщини і розриви, що утворюються в процесі витягування, слябів з кристалізатора. Утворенню газових міхурів сприяють підвищений вміст водню і азоту в трансформаторній сталі, низька швидкість витягування слябів з кристалізатора і особливо - зупинки в процесі розливання.

3. Конкретні випадки аварійних проривів металу процесі безперервного розливання трансформаторної сталі виникають внаслідок несприятливого поєднання технологічних і організаційних факторів, серед яких найчастіше зустрічається підвищена (більше 1530 °С) температура металу в проміжному ковші і підвищений (більше 0,0080%) вміст азоту. У створенні несприятливих умов певну роль відіграють насиченість металу воднем і якість шлакоутворюючої суміші.

4. Для розливання трансформаторної сталі доцільно використовувати шлакоутворюючу суміш, до складу якої входять наповнювачі із зниженою температурою плавлення.

У третьому розділі розглянуті питання охорони праці та техногенної безпеки, дається характеристика шкідливих умов виробництва, санітарно-гігієнічних умов праці, описуються заходи, які забезпечують комфортні умови праці. Також зроблений розрахунок межі вогнестійкості суцільних конструкцій при односторонньому обігріві (за ознакою прогіву).

## Висновки

1. Основною особливістю трансформаторної сталі, що виплавляється в ККЦ, є досить високий регламентований вміст азоту.
2. Випробувано кілька способів отримання в металі необхідного вмісту азоту:
  - продування металу газоподібним азотом на агрегаті доведення сталі;
  - введення в ківш карбаміду в кількості 0,4 - 0,7 кг/т сталі при зливів металу з конвертера;
  - введення при зливів металу в ківш азотованого ферохрому марки ФХН - 1, що містить близько 6% азоту.Найбільш ефективним виявилось введення в ківш при випуску плавки деякої кількості азотованого феросиліцію. Замість азотованого феросиліцію можна використовувати і азотований ферохром.
3. Встановлено, що одна хвилина продувки металу азотом збільшує його вміст на 0,0003 ... 0,0004%. Тривалість обробки азотом протягом 5...7 хв. забезпечує отримання в готовому металі вміст азоту 0,006 ... 0,008%. При продувці металу азотом на АДС істотно знижена ймовірність аварійних ситуацій при розливанні сталі. У той же час, даний спосіб азотування забезпечує необхідний вміст азоту в готовій сталі.
4. Розроблена двохстадійна технологія виплавки, головним завданням якої було отримання в кінці продувки металу, що містить приблизно 0,03% С. Тому конвертерна плавка ведеться з проміжним видаленням частини шлаку, яке здійснюється при зниженні вмісту вуглецю до 0,10 - 0,20%. Саме при такому вмісті вуглецю в металі починається інтенсивне окислення заліза і різке збільшення вмісту оксидів цього елемента в шлаку.
5. Під час випуску роблять продувку металу аргоном в сталерозливних ковшах через пористі пробки, встановлені в днищі сталерозливного ковша та забезпечують якісне відсічення конвертерного шлаку. Первинний шлак відсікають конусом, кінцевий - підривом на металі.
6. Запропонований складний порядок розкислення і легування під час випуску плавки: алюміній, феросиліцій, азотовані феросплави, мідь, вапно.
7. Трансформаторна сталь схильна до утворення газових міхурів в процесі кристалізації, що знижує механічну міцність твердіючої оболонки безперервнолитих слябів і створює умови для аварійного витікання металу через тріщини і розриви, що утворюються в процесі витягування слябів з кристалізатора. Утворенню газових міхурів сприяють підвищений вміст водню і азоту в трансформаторній сталі, низька швидкість витягування слябів з кристалізатора і особливо - зупинки в процесі розливання.
8. Для зниження вмісту водню в число операцій ковшової обробки ввели вакуумування металу на установці циркуляційного типу. При досить низькому залишковому тиску у вакуумній камері вдається знизити вміст водню в металі на 1 ppm і більше.
9. При швидкості витягування слябів з кристалізатора 0,7 м/хв і більше незалежно від температури розливання відбувається здуття слябів як по ширині, так і по товщині. Для вирішення проблеми розроблений особливий температурно-швидкісний режим розливання трансформаторної сталі, нові шлакоутворюючі суміші, особливий режим вторинного охолодження слябів, а також спеціальні заходи щодо зниження вмісту водню в металі.

10. Для МБЛЗ розробили нову шлакоутворюючу суміш з меншою температурою плавлення.
11. Для зменшення ймовірності проривів розливка трансформаторної сталі ведеться при низькій швидкості витягування безперервно-литих заготовок з кристалізатора - 0,4 - 0,5 м/хв.
12. Основною причиною високої частоти аварійних проривів металу при розливанні трансформаторної сталі є поєднання низької механічної міцності з недостатньою пластичністю легованої кремнієм сталі при температурі 1200 °С і вище.
13. Наявність в сталі підвищених концентрацій кремнію, міді, азоту та алюмінію поряд з низьким вмістом вуглецю і марганцю несприятливо позначаються на механічних властивостях сталі при високих температурах. Висока частота аварійних проривів при розливанні трансформаторної сталі обумовлена низьким рівнем механічних властивостей цього металу при високих температурах.
14. Причиною, що ініціює утворення дефекту «міхур - здуття» в листі трансформаторної сталі, є скупчення неметалічних включень, поблизу яких утворюються пори - зародки майбутніх бульбашок. Відбраковування і якісний склад неметалевих включень поблизу дефектів дозволяє припустити ендогенний характер неметалічних включень, що провокують утворення дефекту «міхур - здуття».

#### **Список опублікованих магістрантом робіт**

1. Єрмарченко Ю.А. Дослідження технології позапічної обробки трансформаторної сталі / Ю.А.Єрмарченко, О.Г.Кириченко // Збірник наукових праць магістрантів кафедри МЧМ. Випуск 11. - Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 2015.- С.49-56.
2. Єрмарченко Ю.А. Позапічні способи підвищення якості мартенівської сталі / Ю.А.Єрмарченко // Матеріалі ХХ науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА. Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості : Том І. / Запорізька держана інженерна академія. - Запоріжжя: ЗДІА, 2015.- С. 4.