

**Міністерство освіти України
Державна металургійна Академія**

На правах рукопису

ПОЖИВАНОВ МИХАЙЛО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

**“РОЗРОБКА ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ТА
КОМПЛЕКСНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ
ОСОБЛИВО ЧИСТОЇ ВИСОКОЯКІСНОЇ
КОНВЕРТЕРНОЇ СТАЛІ ДЛЯ ТОВСТОГО ЛИСТА”**

Спеціальність 05.16.02 - Металургія чорних металів

ДИСЕРТАЦІЯ

**на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук у формі наукової доповіді**

м. Дніпропетровськ

1994 р.

Робота виконана на металургійному комбінаті "Азовсталь",
Новолипецькому металургійному комбінаті та у Державній
металургійній Академії України.

Науковий консультант:

БАПТИЗМАНСЬКИЙ

Вадім Іпполитович-

-член-кор. Національної Академії
наук України, доктор технічних наук,
професор

Офіційні опоненти:

ПЕРЕЛОМА

Віталій Олександрович

-член-кор. Національної Академії
наук України, доктор технічних
наук, професор, завідуючий
відділом Інституту проблем лиття
НАН України

ЯКОВЛЄВ

Юрій Миколайович

-доктор технічних наук,
професор, завідуючий кафедрою
теорії металургійних процесів
Державної металургійної Академії
України

ДЮДКІН

Дмитро Олександрович

-академік інженерної Академії
України, доктор технічних наук,
професор, директор Донецького
науково-дослідного інституту
чорної металургії

Провідне підприємство:

Дніпровський металургійний
комбінат ім. Дзержинського.

Захист відбудеться 13 грудня 1994 р. у 12.30 на засіданні
спеціалізованої ради Д.068.02.01 по захисту дисертацій на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук при Державній
металургійній Академії України за адресою: 320635,
м.Дніпропетровськ, 5, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державної
металургійної Академії України.

Дисертація розіслана 12 листопада 1994 р.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Вчений секретар
спеціалізованої ради,
доктор технічних наук

Підпис

В. К. ШАТКО

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00777193 (Y)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи.

В останні роки чітко виявляється тенденція підвищення попиту металопереробних галузей на прокат із низьколегованих та вуглецевих сталей підвищеної якості. Масове споживання високоякісного металопрокату має місце у газовій та нафтовій промисловості, автомобільному та транспортному машинобудуванні, будівництві та мостобудуванні, атомному та хімічному машинобудуванні і т.д. На металургійному комбінаті "Азовсталь" за період з 1978 р. до цього часу розроблено та освоєно близько 40 нових низьколегованих та вуглецевих марок сталі підвищеної якості, в тому числі для магістральних газопроводів північного виконання різних класів міцності, для устаткування та труб, стійких до сірководневого розтріскування, будівельних та мостових конструкцій підвищеної суцільності та ізотропності, для суднобудування різних категорій за вимогами Регістру, хімічного машинобудування та ін. [1, 2]. Частка сталей підвищеної якості у сортаменті конвертерного та товстолистого цехів становить більше 50%.

Істотне підвищення якісних та експлуатаційних характеристик товстолистого прокату може бути забезпечене за рахунок підвищення ступеня рафінування сталі від шкідливих домішок, неметалевих включень та газів на стадії сталеплавильного переділу. Особливе значення надається питанням глибокої десульфурзації металу.

Про актуальність робіт, спрямованих на розробку комплексних технологій отримання особливо чистих сталей для виробництва товстолистого прокату, свідчать комплексні міжгалузеві програми "Чиста сталь" та "Надійність", відповідно до яких проводились дослідження з деяких питань, представлених у даній роботі.

Мета роботи.

На основі досліджень та теоретичного аналізу процесів рафінування чавуну та сталі розробити наукові основи та умови нових марок сталі відповідального призначення,

технологію виробництва особливо чистих конвертерних сталей для товстолистого прокату.

Наукова новизна.

Встановлено основні термодинамічні та кінетичні закономірності десульфурзації чавуну гранульованим магнієм. Визначено на основі сучасної теорії масообміну лімітуючі ланки процесів засвоєння магнію чавуном та його взаємодії з сіркою. Встановлено механізм та фактори, що визначають вплив на засвоєння магнію чавуном: його температура, тип газу-носія, глибина введення магнію у метал та інші параметри. Сформульовано наукові основи технології виплавки в конвертерах високоякісної сталі для товстолистого прокату відповідального призначення. Уперше в Україні розроблено раціональну комплексну технологію одержання особливо чистої сталі на основі використання в шихті металізованих обкотишів, спеціальних засобів шлакоутворення. Встановлено основні термодинамічні та кінетичні особливості десульфурзації сталі рідкими синтетичними шлаками та кусковими твердими шлакоутворюючими сумішами /ТШС/ при випусканні її в великовантажні 350-тонні сталерозливні ковші, а також на установці доводки металу у ковші.

Відпрацьовано оптимальні режими термодформаційної обробки низьколегованих сталей, забезпечиваючи структуру металу, яка в поєднанні з високим ступенем рафінування забезпечує унікальний комплекс механічних /міцність, пластичність, низькотемпературна в'язкість/ та службових /зварюваність, корозійна та сірководнева стійкість, холодностійкість, ізотропність/ властивостей товстолистого прокату.

Практична цінність.

Розроблено раціональну технологію десульфурзації чавуну гранульованим магнієм, що забезпечує в залежності від витрати магнію кінцевий вміст сірки на рівні 0,002-0,005% та високий ступінь засвоєння магнію - 75-90%. Встановлено, що найбільш доцільно проводити десульфурзацію чавуну магнієм

в заливальних ковшах безпосередньо перед його заливанням у конвертер, а як газ-носії застосовувати природний газ. В 350-т конвертерах отримано метал з особливо низьким вмістом азоту, фосфору, сірки та домішок кольорових металів без використання методів ковшової обробки сталі. Розроблено та освоєно раціональну комбіновану технологію десульфурації сталі у сталерозливних ковшах з муліто-корундовою та перикладно-вапняною /смолодоломітовою/ футеровкою зменшеною кількістю рідкого синтетичного шлаку з додаванням ТШС, що забезпечує ступінь десульфурації не менше 70-75%. Застосування розробленої технології забезпечило умови для виробництва сталей з вмістом сірки не більше 0,004%.

Випробувано технологію десульфурації сталі порошкоподібними сумішами на основі вапна та плавикового шпату, інjektуємими у метал в струмені аргону через заглибну футеровану фурму на УДМ. При вдуванні порошкоподібної суміші в кількості до 4 кг/т досягнуто ступінь десульфурації 70%, що дозволяє при широкому освоєнні цієї технології повністю відмовитись від застосування дефіцитного та дорогого синтетичного шлаку.

Запропоновано заходи підвищення ефективності знесірчення сталі при випуску плавки із конвертера та при обробці на УДМ. Визначено та впроваджено оптимальні параметри продувки металу інертним газом на УДМ, що забезпечують необхідне усереднення металу за складом та температурою перед розливкою.

Розроблено оптимальні режими термодетонаційної обробки металу для листового прокату товщиною 14-18 мм із низьколегованих сталей різного призначення, які в поєднанні з високою чистотою сталі забезпечують унікальну холодостійкість та тріщиностійкість сталі при високих показниках його міцності.

Реалізація результатів роботи.

Запропоновані на основі теоретичних та експериментальних досліджень науково-технічні рішення забезпечили умови для розробки і освоєння в промислових умовах нових марок сталі відповідального призначення,

розширення сфер використання сталей масового призначення з новим комплексом механічних та експлуатаційних властивостей, збільшення обсягу виробництва якісних та особливоякісних сталей у конвертерному та товстолистовому цехах комбінату "Азовсталь", економію матеріалів та металу. Внаслідок промислового впровадження результатів досліджень отримано економічний ефект за рахунок зниження собівартості металопрокату /у цінах 1990 р./ у розмірі 17,865 млн.крб.

Апробація роботи.

Матеріали роботи викладені та обговорені на 7-й Всесоюзній науково-технічній конференції "Теория и практика кислородно-конвертерных процессов" /м.Дніпропетровськ, 1987 р./, 9-й Всесоюзній конференції з фізико-хімічних основ процесів виробництва сталі /м.Москва, 1989 р./, Міжнародній конференції "X.MEZINARODNI HUTNIKA KONFERENCE /Trinea Rigen, 1989 р./, 11-й Всесоюзній конференції з проблем зливка /м.Волгоград, 1990 р./, 10-й Всесоюзній конференції з фізико-хімічних основ металургійних процесів /м.Москва, 1991 р./, Всесоюзній нараді "Качество толстолистового проката /штрипса/ из новых низколегированных сталей и труб для магистральных газопроводов" /м.Маріуполь, 1989 р./, 5-й Всесоюзній конференції "Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов" /м.Маріуполь, 1991 р./, 10-й Всесоюзній конференції з фізико-хімічних основ металургійних процесів /м.Москва, 1991 р./, 2-й Всесоюзній науково-технічній конференції за участю іноземних спеціалістів "Совершенствование металлургической технологии в машиностроении" /м.Волгоград, 1991 р./, Всесоюзній конференції "Внепечная обработка металлов" /м.Київ, 1991 р./, 1-му конгресі сталеплавильників /м.Москва, 1992 р./.

Публікації.

За матеріалами досліджень опубліковано 38 праць, отримано 14 авторських свідоцтв, 14 позитивних рішень по

заявам, 1 патент Російської Федерації.

Експериментальні та теоретичні дослідження, що входять у дисертацію, виконані автором разом із співробітниками комбінатів "Азовсталь", Державної металургійної Академії України, ІЧМ НАН України, МІСІС, ЦНДІЧМ та інших організацій за активною участю автора або під його керівництвом. Основні ідеї та методики їх проведення належать автору.

Об'єм роботи.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів та висновків, містить 54 сторінок машинописного тексту, 2 таблиці, 15 малюнків, список літератури із 33 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

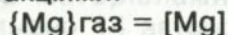
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА РОЗРОБКА РАЦІОНАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ ГРАНУЛЬОВАНИМ МАГНІЄМ

На світовому та вітчизняному ринку спостерігається безперервне збільшення попиту на низькосірчасту високоякісну сталь. На цей час освоєно промислове виробництво сталей з вмістом сірки менше 0,004%, а до 2000 року прогнозується зниження її вмісту у сталі промислової виплавки до 0,001% та менше. Це ставить перед металургами завдання по максимальному зниженню вмісту сірки на всіх стадіях виробництва: при підготовці шихтових матеріалів для конвертерної плавки, продуванні металу у конвертерах та обробці в сталеразливних ковшах.

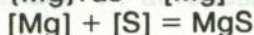
Одним з найбільш раціональних та економічних методів отримання металопродукції з заданим вмістом сірки є позапічна десульфурація чавуну інжектуванням у розплав диспергованих реагентів. Як десульфатор найбільше поширення з 70-х рр. в вітчизняній практиці, а з 80-х рр. і за кордоном набув магній, який забезпечує високий ступінь десульфурації. Проте висока ціна магнію, значні енерговитрати та капіталоємкість його виробництва вимагають підвищення ефективності та економічності його використання. В даній роботі проведено теоретичний аналіз процесів десульфурації чавуну магнієм, визначені фактори, що визначають ефективність його застосування [3], в промислових умовах відпрацьована та впроваджена технологія виробництва низькосірчастих чавунів для конвертерної плавки [4,5,6].

1.1. ТЕРМОДИНАМІКА ТА КІНЕТИКА ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ

Механізм десульфурації чавуну магнієм описується реакціями:



/1.1/



/1.2/

Костанта рівноваги реакції /1.2/:

$$K = \frac{\alpha_{\text{MgS}}}{\alpha_{[\text{S}]} \alpha_{[\text{Mg}]}} \cong \frac{\alpha_{\text{MgS}}}{[\% \text{S}] f_{\text{S}} [\% \text{Mg}]} \quad /1.3/$$

може бути визначена з рівняння

$$\Delta G^{\circ} = -300004 + 117,19T, \text{ Дж/моль} \quad /1.4a/$$

$$\ln K = 36101/T - 14,10 \quad /1.4b/$$

де

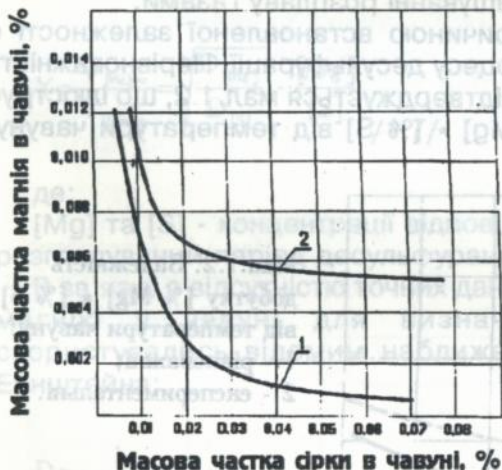
α - активність компоненту;

f - коефіцієнт його активності;

T - температура розплаву, °K;

$[\% \text{S}]$ та $[\% \text{Mg}]$ - відповідно, концентрації сірки та магнію у металі.

Ряд авторів вважає, що MgS виділяється переважно у твердому вигляді, його активність дорівнює одиниці і кінцевий вміст сірки у чавуні /після його обробки/, в зв'язку з



Мал.1.1.1. Залежність вмісту сірки у чавуні після обробки магнієм від його концентрації у металі при температурі 1350°C:

1 - експериментальні значення.

2 - рівноважні значення

енергійним перемішуванням останнього газами, визначається рівновагою реакції /1.2/ та кінцевою концентрацією магнію у металі, тобто

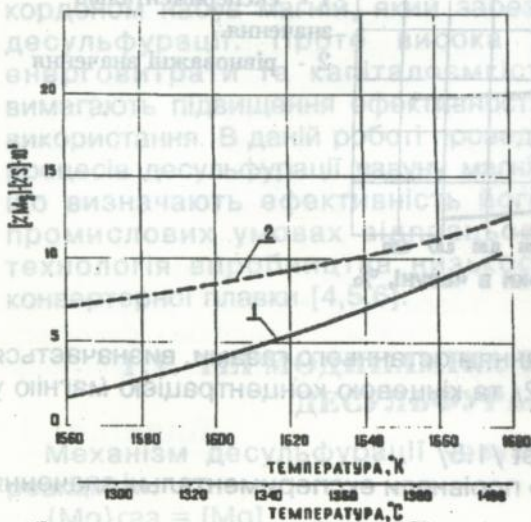
$$[\% \text{S}] \cdot [\% \text{Mg}] = \text{const} \quad /1.5/$$

Для перевірки цього порівняли експериментальні значення

концентрацій магнію та сірки у чавуні за даними виробничих випробувань /мал.1.1/ з розрахунковими значеннями за константою рівноваги реакції /1.2/ при однаковій температурі /1350°C/. В розрахунках врахували вплив концентрацій вуглецю та кремнію в чавуні. Видно, що антибатна залежність вмісту сірки від кінцевої концентрації магнію, що витікає із рівняння /1.3/, в цілому додержується. Проте дійсні значення концентрацій компонентів вище розрахункових рівноважних, причому при збільшенні вмісту сірки у металі відхилення від рівноваги помітно збільшується.

З термодинамічних позицій встановлений факт можна пояснити тим, що при зменшенні вмісту сірки у металі відповідно знижується середня активність і концентрація MgS в продуктах реакції /1.2/. Це може мати місце у тому випадку, якщо реакція /1.2/ протікає не тільки на твердих частинках (MgS)_{тв}, але і на поверхні оксидних неметалевих включень у чавуні і частинках -продуктах дроблення покривного шлаку при інтенсивному перемішуванні розплаву газами.

Другою можливою причиною встановленої залежності є кінетичні особливості процесу десульфурації. Нерівноважність розглядуваної системи підтверджується мал.1.2, що ілюструє залежність добутку $[\% Mg] \cdot [\% S]$ від температури чавуну.



Мал.1.2. Залежність добутку $[\% Mg] \cdot [\% S]$ від температури чавуну:
1 - рівноважні;
2 - експериментальні.

Видно, що ступінь відхилення від рівноваги зменшується із зростанням температури металу та зниженням його в'язкості, що завжди сприяє прискоренню масообмінних процесів. Цей вплив безсумнівно кінетичний.

При зниженні вмісту магнію та сірки у металі утруднюється масоперенос компонентів через пограничний шар на поверхні шлакосульфідних частинок, питома інтенсивність якого визначається відомим рівнянням:

$$V_{\text{диф. ун.}} = \beta \cdot \Delta[X] = \frac{DX}{\delta} \cdot \Delta[X] \quad /1.6/$$

тут:

- β - коефіцієнт масопереносу;
- $\Delta[X]$ - різниця концентрацій компоненту X;
- DX - коефіцієнт атомарної дифузії компоненту;
- δ - товщина пограничного шару.

Для визначення лімітуючої ланки процесу у розглядуваному випадку можна використати рівнення Давенпорта:

$$Y = \frac{V_{[Mg]_{\text{max}}}}{V_{[S]_{\text{max}}}} = \sqrt{\frac{D_{[Mg]}}{D_{[S]}}} \cdot \frac{[Mg]}{[S]} \quad /1.7/$$

де:

$[Mg]$ та $[S]$ - концентрації відповідних елементів у чавуні в розглядуваний період десульфурації.

В зв'язку з відсутністю точних даних про коефіцієнт дифузії магнію у чавуні для визначення співвідношення скористувались відомим наближеним рівнянням Стокса-Ейнштейна:

$$D \approx \frac{1}{6\pi r \cdot \mu} \quad /1.8/$$

де r - радіус частинок розчиненої речовини;
 μ - в'язкість рідини.

За літературними даними $\Gamma_{Mg} = 1,6 \cdot 10^{-4}$; $\Gamma_S = 1,04 \cdot 10^{-4}$. При високих вмістах сірки 0,02-0,06% концентрація магнію у чавуні становить звичайно 0,004-0,007%. Підставляючи ці дані у рівняння /1.7/, знаходимо $Y \approx 0,1-0,3$. Таким чином, в області

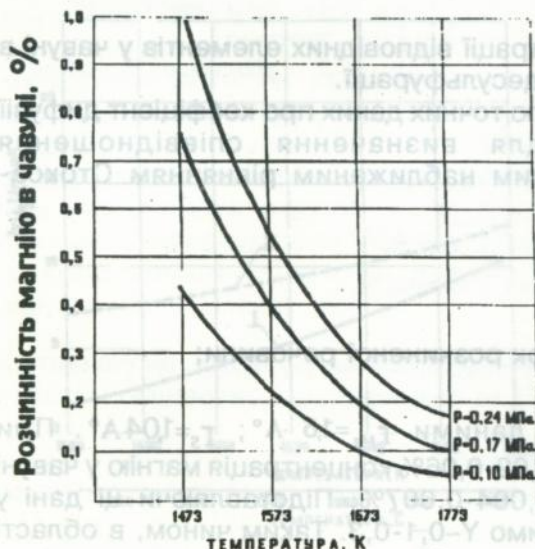
розглядуваних підвищених вмістів сірки процес десульфурації гальмується масопереносом магнію.

На практиці в міру зниження концентрації сірки у чавуні повинна відбуватись зміна лімітуючої процес ланки. Проте треба враховувати, що магній, який вводиться у метал, витрачається не тільки на виведення сірки, але і на накопичування його у металі. Причому при зменшенні $[S]$ частка накопичуваного магнію, відповідно до термодинаміки реакції /1.2/, прогресивно зростає, що зменшує загальний масопотік магнію та сірки у зону реакції /1.2/. Це збільшує область лімітування розглядуваного процесу дифузією магнію.

1.2. ЗАСВОЄННЯ МАГНІЮ

Дуже важливим є питання про ступінь корисного засвоєння магнію $[\alpha_{Mg}]$. В розрахунку цієї величини при відомій витраті гранульованого магнію враховували вміст чистого магнію в ньому, а також взаємодію магнію з сіркою чавуну /кількість виведеної сірки/ та вміст магнію у чавуні $[Mg]_{кін}$. Встановили, що в умовах досліджень величина засвоєння магнію чавуном при обробці чавуну в чавуновізних ковшах містністю 140-т і використанні як газу-носія природного газу

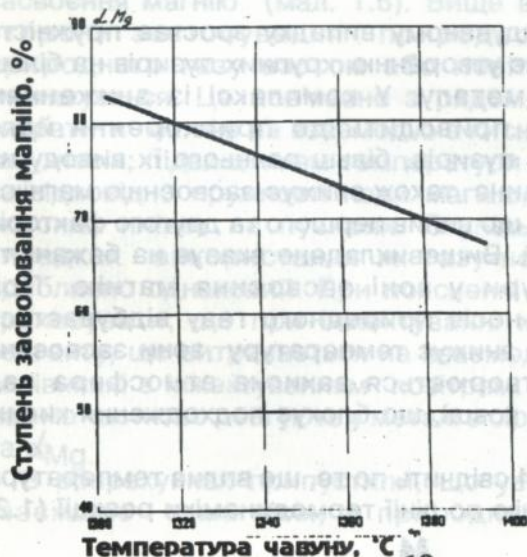
Мал.1.3. Залежність розчинності магнію від температури чавуну.



/СН4/ змінювалась в межах 50-90%. Це свідчить про те, що магній далеко не завжди засвоюється достатньо повно і що підвищенню ступеня його засвоєння, особливо корисного /тобто на виведення сірки/, належить приділяти значну увагу.

Для встановлення закономірностей розглядуваного процесу є важливим питання про те, що заважає засвоєнню пари магнію металом, які лімітуючі ланки процесу. В загальному випадку цими ланками можуть бути: дифузія частинок магнію у газовій фазі пузирів до поверхні останніх та масоперенос розчиненого магнію у металі через поверхневий пограничний шар пузирів.

При продувці чавуну та частина магнію, котра не встигла випаруватися і вноситься у метал в вигляді краплин або твердих частинок, перетворюється на пузирі пари магнію. В цьому випадку дифузія у газовій фазі не повинна впливати на динаміку його розчинення у чавуні. Пузирі при цьому будуть просто зменшуватись в об'ємі. Випаруваний магній надходить у метал у вигляді пузирів, що містять крім магнію і газ-носії. При звичайній витраті природного газу на 1 кг магнію 0,083-0,1 м³ пузирі другого виду мають вагову концентрацію парів магнію близько 93-94%. Тут можливий розвиток дифузії усередині пузиря.



Мал. 1.4. Залежність ступеня корисного засвоєння магнію чавуном (α_{Mg}) від температури чавуну.

Розрахунки з застосуванням рівняння /1.6/ та використанням даних по швидкості дифузії у газах, швидкості дифузії магнію в пограничному шарі пузиря при температурі чавуну 1300-1400°C, розчинності магнію у чавуні /мал.1.3/, його імовірному коефіцієнті дифузії та товщині пограничного шару пузирів $\sim 10^{-3}$ см показали, що основною лімітуючою ланкою процесу розчинення магнію є масоперенос його у металі. Головною причиною цього є те, що коефіцієнт масопереносу у газах в тисячу разів більший, ніж у рідинах.

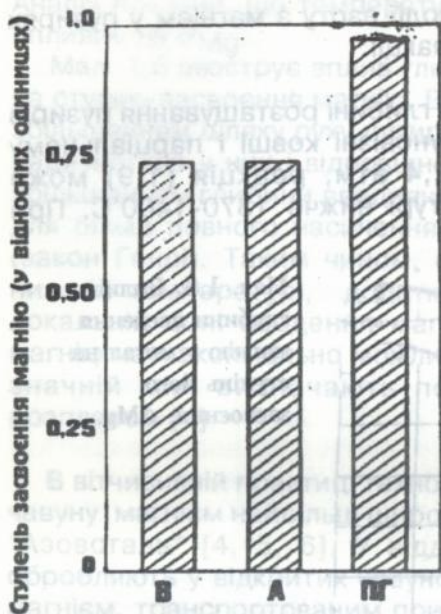
З мал. 1.2 видно, що з підвищенням температури чавуну добуток [% S] * [% Mg] збільшується, тобто з зростанням температури десульфурація погіршується, що збільшує витрату магнію. Залежність, наведена на мал.1.2, безсумнівно пов'язана з термодинамікою реакції /1.2/, її екзотермічністю, що зумовлює зменшення константи рівноваги K та зсув реакції /1.2/ ліворуч із зростанням температури.

Мал. 1.4 ілюструє вплив температури чавуну в умовах досліджень на ступінь корисного засвоєння магнію при використанні як газу-носія природного газу. Дана залежність пояснюється тим, що, по-перше, пропорційно підвищенню температури чавуну відбувається збільшення об'єму пузирів і відповідно швидкість їх спливання. Знижується розчинність магнію у металі /мал.1.3/, що зменшує $\Delta[Mg]$ та його засвоєння.

Крім того, в розглядуваному випадку зростає пружність пари магнію, що сприяє утворенню крупних пузирів на більш низьких горизонтах металу. У комплексі із зниженням в'язкості металу це приводить до прискорення його циркуляції, спливанню пузирів, більш раннього їх виводу на поверхню чавуну. Останнє також знижує засвоєння магнію.

Порівняння показує, що вплив першого та другого факторів приблизно рівноцінний. Вищевикладене вказує на бажаність зниження температури у зоні засвоєння магнію. При використанні як газу-носія природного газу відбувається дисоціація метану, що знижує температуру зони засвоєння магнію до 1200°C, створюється захисна атмосфера над поверхнею розплаву у ковші, що блокує подходження кисню з атмосфери у метал.

Аналіз мал. 1.2 та 1.4 свідчить про те, що вплив температури чавуну на витрату магнію по лінії термодинаміки реакції (1.2)



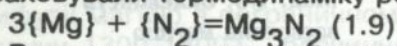
Мал. 1.5. Залежність засвоєння магнію (у відносних одиницях) від типу газу-носія (П-повітря, А-азот, ПГ-природний газ).

більший, ніж по лінії умов (кінетики) засвоєння магнію.

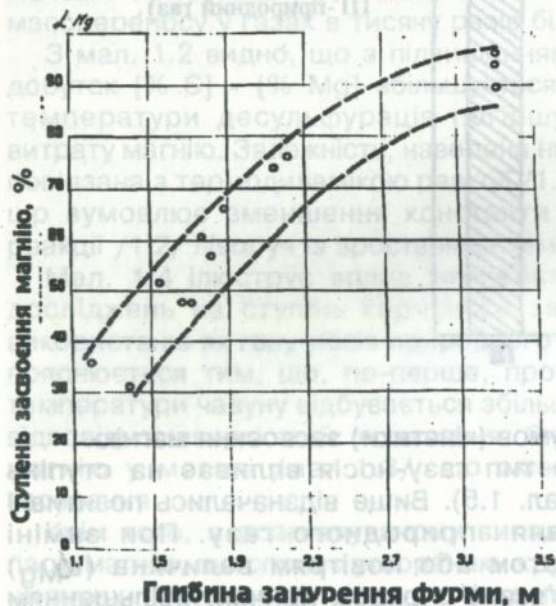
Підтверджено, що тип газу-носія впливає на ступінь засвоєння магнію (мал. 1.5). Вище відзначались позитивні сторони застосування природного газу. При заміні природного газу азотом або повітрям величина (α_{Mg}) зменшується. Це пов'язано з рядом причин: збільшенням витратити магнію на взаємодію з киснем та частково азотом газу-носія; підвищенням температури пузирів з цієї причини та відповідно пружності пари магнію, гальмуючим впливом окисних плівок на пузирях. Ступінь засвоєння магнію у випадках використання як газу-носія азоту та повітря приблизно однаковий. При поясненні цього факту належить враховувати, що при інжектуванні магнію азотом частка реагенту, що витрачається на взаємодію з азотом, більша в порівнянні з інжектуванням повітрям. Проте, надалі нітриди магнію частково реагують у металі з сіркою, що також впливає на α_{Mg} .

В розрахунках припустили, що увесь кисень газу-носія взаємодіє з магнієм, а природний газ дисоціює. При

розгляданні можливості взаємодії азоту з магнієм у пузирях враховували термодинаміку реакції:



Розрахунки показали, що на глибині розташування пузирів у металі 1-2м (140-тонні чавуновізні ковші і парціальному тиску магнію в межах 1,7-2,4 атм, реакція (1.9) може протікати лише при температурі нижче 1370-1400°C. При



Мал. 1.6. Вплив глибини введення магнію у метал на ступінь його засвоєння, α_{Mg} .

звичайній середній температурі чавуну близько 1350°C початок реакції (1.9) термодинамічно можливий. Проте, внаслідок підвищення температури газів у пузирях (в зв'язку взаємодією магнію з киснем та азотом) і спливанням пузирів (зміна порціального тиску магнію) реакція (1.9) загасає і протікає у подальшому з інтенсивністю, що залежить від зовнішнього тепловідводу.

В зв'язку з цим припустили, що ступінь витрачання азоту на взаємодію з магнієм у випадку використання повітря суттєво менший, ніж при використанні азоту. Необхідно відзначити, що зовнішній тепловідвід істотно знижує (у випадку використання природного газу - підвищує) температуру газів у пазирі, особливо на його периферії.

Аналіз показав, що температурний фактор найбільш сильно впливає на α_{Mg} .

Мал. 1.6 ілюструє вплив глибини введення магнію у метал на ступінь засвоєння магнію. Він дуже суттєвий та пов'язан із збільшенням шляху руху пузирів у металі, парціального тиску пари магнію у них і відповідно розчинності його у металі. З збільшенням глибини введення парів магнію у розплав умови для більш повного насичення чавуну магнієм поліпшуються (закон Генрі). Таким чином, обробка розплаву при більш низькій температурі, додаткове зниження температури в локальній зоні введення магнію, а також введення парів магнію на максимально можливу глибину є факторами, що в значній мірі визначають показники засвоєння магнію розплавом [4].

В вітчизняній практиці технологічний процес десульфурзації чавуну магнієм найбільш широко застосовується на комбінаті "Азовсталь" [4, 5, 6]. У відділенні десульфурзації чавун обробляють у відкритих чавуновізних ковшах гранульованим магнієм, транспортованим природним газом через фурми з випарними камерами. Магній вводиться на глибину 200 мм від дна ковша (близько 2 м) з масовою швидкістю 6-10 кг/хв. при витраті природного газу 30-50 м³/год. Характеризована технологія забезпечує ступінь засвоєння магнію чавуном 75-90%. Залишковий вміст сірки в залежності від її початкового вмісту в чавуні і витрати магнія складає 0,002-0,015%.

Ефективність процесу може бути значно підвищена при проведенні десульфурзації чавуну не у доменних, а в заливальних ковшах сталеплавильних цехів. В цьому випадку обробці буде піддаватися чавун, що має мінімально можливу температуру, а це підвищить ступінь засвоєння магнію. Стає можливим збільшити масу оброблюємого чавуну в 3-4 рази при значно більшій глибині рідкої ванни і меншій питомій поверхні контакту чавуну з ковшовим шлаком. Досягнення більш повної асиміляції парів магнію чавуном дає можливість додатково підвищити технологічність введення магнію та збільшити налив ковшів до рівня, близького до номінального. Наявність в заливальних ковшах меншої кількості шлаку в порівнянні з доменними ковшами поліпшить шлаковий режим та спростить рішення питань коригування складу ковшових

шлаків для підвищення їх сульфідної ємкості до потрібного рівня. Перевагою обробки чавуну у заливальних ковшах є також усунення додаткових переливів знесірченого чавуну, при яких можливі його часткова ресульфуратація та зниження вмісту залишкового магнію, який є бар'єром для ресульфуратації.

Експериментальну перевірку викладених положень провели на дослідній установці конвертерного цеху комбінату "Азовсталь" [5]. Десульфуратацію чавуну проводили в 350-тонних заливальних ковшах шляхом вдування гранульованого магнію в струмені аргону з використанням фурми з дзвоном, занурюваної на глибину до 3,5 м. Вага чавуну перед обробкою становила близько 280 т, товщина шлаку 40 мм, рівень розплаву до зрізу ковша 400 мм, температура чавуну коливалась у межах 1315-1320°C. Для експериментів використали чавун із міксеру конвертерного цеху. При загальних витратах магнію 0,143 кг/т чавуну (0,13 кг/т активного магнію) вміст сірки знизився з 0,012 до 0,002%. Ступінь десульфуратації становив 83,3%, а витрата активного магнію на одиницю видаленої сірки становила 1,3 кг/кг. Проведене випробування технології десульфуратації чавуну в заливальних ковшах підтвердило припущення про більш високу її ефективність в порівнянні з обробкою в чавуновізних ковшах. Ступінь засвоєння магнію збільшується приблизно в 1,4 рази, питома витрата реагенту та витрати тепла знижуються в 1,2-1,5 рази. Відпрацьовані раніше параметри продувки дозволили проводити процес спокійно, без викидів. При цьому значно знизилось димовиділення.

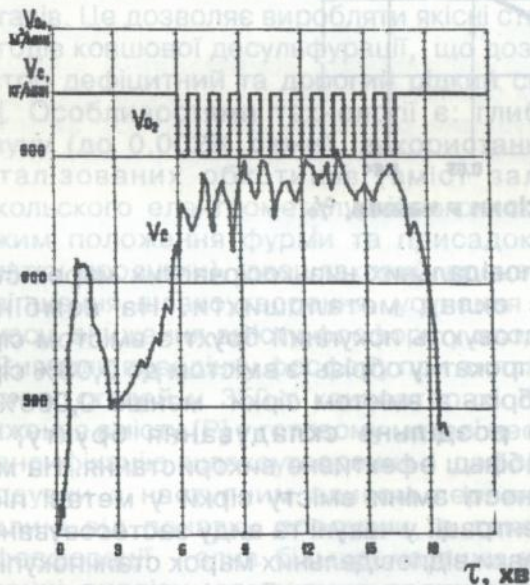
Викладені організаційні та технологічні переваги десульфуратації чавуну в заливальних ковшах сталеплавильних цехів надають підстави рекомендувати при проектуванні нових та реконструкції діючих конвертерних цехів оснащувати їх установками позапічної десульфуратації гранульованим магнієм в заливальних ковшах.

2. РАЦІОНАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРОДУВКИ ЧАВУНУ У КОНВЕРТЕРАХ.

В процесі конвертерної плавки визначальною є реакція окислювання вуглецю, перебіг якої впливає на гідродинаміку ванни, масоперенос та шлакоутворення, а також техніко-

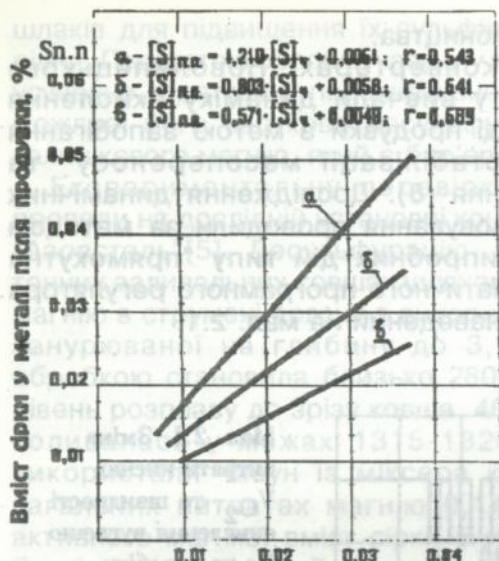
економічні показники виробництва.

У великотонажних конвертерах Новолипецького металургійного комбінату вивчали динаміку окислення вуглецю в другому періоді продувки з метою запобігання значних коливань V_c , стабілізації масопереносу та поліпшення шлакоутворення (8). Дослідження динамічних характеристик знавуглецьовування проводили за методом накладеноперіодичних випробних дій типу "прямокутна хвиля" з допомогою автоматичного програмного регулятора [8, 9, 71]. Перебіг плавки наведений на мал. 2.1.



Мал. 2.1. Зміна витрати кисню V_{O_2} та швидкості окислення вуглецю V_c по перебігу продувки.

Видно чітку залежність між змінами витрати кисню та коливаннями швидкості окислення вуглецю (V_c). Зміна витрати кисню (15-20% від початкової) відповідає середній амплітуді змін V_c при сталій витраті кисню. Застосування даного режиму продувки зумовило поліпшення шлакоутворення, спокійний перебіг плавки, деяке зниження окисленості металу та шлаку, підвищення виходу придатного на 0,2-0,3% та стійкості футеровки на 7-9%. Нова технологія впроваджена на НЛМК.



Мал. 2.2. Залежність вмісту сірки у металі після продувки в конвертері від вмісту сірки у чавуні:
 а- покупний брухт
 б- оборотний брухт
 в- низькосірчаста обрізь.

Масова частка сірки у чавуні, %

При виплавці відповідальних низькосірчастих марок сталі дуже важливим є склад металошихти. На комбінаті "Азовсталь" використовують покупний брухт з вмістом сірки до 0,07%, оборотну прокатну обрізь з вмістом до 0,03% сірки та низькосірчасту обрізь з вмістом сірки менше 0,006%. У цеху організовано роздільне складування брукту, що забезпечує його найбільш ефективне використання. На мал. 2.2 наведені залежності зміни вмісту сірки у металі після продувки від її концентрації у чавуні та виду застосовуваного брукту [1]. Для виплавки відповідальних марок сталі покупний брухт, як правило, не застосовується. Дослідження показали, що ступінь десульфурації металу у 350-тонних конвертерах залежить від сумарного надходження сірки з усіх джерел і в середньому не перевищує 15-25%. Тому основна десульфурація забезпечується ковшовою обробкою.

В конвертерному цеху комбінату "Азовсталь" розроблена та впроваджена комплексна технологія виплавки високоякісних низькосірчастих сталей відповідального призначення (09Г2БТ, 10Г2БТ, 08Г2ФБТ та ін.) класу міцності

К-56 - К-65 підвищеної холодостійкості. Особливостями технології є: використання чавуну з вмістом сірки 0,010 - 0,015%, низькосірчастої оборотної обрізі, використання кисню з вмістом азоту не більше 0,1%, концентрація вуглецю перед випуском із конвертера не менше 0,05%, ефективна відсічка конвертерного шлаку та інші обов'язкові елементи [1,2,10]

Розроблена комплексна технологія одержування в 350-т конвертерах особливо чистої первородної сталі з вмістом у металі після продувки фосфору 0,003-0,005%, азоту 0,002-0,003%, сірки 0,003%, практично без домішок кольорових металів. Це дозволяє виробляти якісні сталі без використання методів ковшової десульфурзації, що дозволяє заощаджувати гостро дефіцитний та дорогий рідкий синтетичний шлак [6, 11]. Особливостями технології є: глибока десульфурация чавуну (до 0,002% сірки), використання як охолоджувача металізованих обкотишів (вміст заліза близько 90%) Оскольського електрометалургійного комбінату, спеціальний режим положення фурми та присадок вапна (20-40% до початку продувки), двошлаковий процес, що забезпечило поліпшення шлакоутворення, усунення звертання шлаку і виносу, зниження вмісту фосфору у продуктому металі.

Вивчили поведінку фосфору при виплавленні звичайних та якісних сталей у 350-т конвертерах. Встановили, що для зниження вмісту [P] у готовому металі необхідно забезпечити: інтенсифікацію шлакоутворення і дефосфорації на початку продувки з наступним зливом первинного шлаку на 4-5 хвилині від початку продувки, а також для запобігання рефосфорації - злив більшої частини кінцевого шлаку при чеканні аналізу, загущення залишкової його частини у конвертері і в ковші перед закінченням зливу вапном або вапняном, надійну відсічку конвертерного шлаку в процесі випуску плавки [12]. Таку технологію застосовують при виплавці сталі особливо відповідального призначення.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА РОЗРОБКА ДОЦІЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОВШОВОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ.

3.1. ДЕСУЛЬФУРАЦІЯ ПРИ ВИПУСКУ ПЛАВКИ ІЗ КОНВЕРТЕРА ТА ШЛЯХИ ЇЇ ПОЛІПШЕННЯ.

Для отримання низькосірчастого металу на цей час широко застосовуються різні методи позапічної металургії, засновані на перерозділі сірки між металом та чистим за сіркою рафінувальним шлаком. Особливе місце між ними займають способи, якими передбачено наведення у ковші під час випуску плавки активного покривного шлаку шляхом вводу рідкого синтетичного шлаку (СШ) або твердих шлакоутворювальних сумішей (ТШС).

Процесом рафінування розплаву за рахунок активних шлакових сумішей можна керувати, а отже, і прогнозувати результат обробки, тільки при наявності моделі, що враховує вплив основних технологічних факторів на результат процесу. Найбільш зручним для опису процесу є коефіцієнт розподілу сірки між металом і шлаком, широко використовуваний на практиці. Оскільки процес є по суті одношлаковим, незважаючи на те, що рафінування у ковші іде як під час випуску металу із агрегату, так і під час обробки плавки на УДМ (установка доводки металу у ковші), для нього вірне співвідношення:

$$[S]_k = \frac{[S]_0}{1+y \cdot L} \quad (3.1)$$

де $[S]_k$, $[S]_0$ - кінцевий та початковий вміст сірки у металі;
 L - фактичний коефіцієнт розподілу сірки, досягнутий у результаті рафінування розплаву;

y - відношення маси шлаку до маси металу.

Природно припустити, що швидкість зміни L під час обробки розплаву на УДМ буде описуватись співвідношенням:

$$-\frac{dL}{dt} = K \cdot (L^T - L) \quad (3.2)$$

де K - коефіцієнт, залежний від технології обробки плавки на УДМ;

L^T - теоретичний (рівноважний) коефіцієнт розподілу сірки, досягнутий в даних умовах, тобто при даному складі металу, шлаку і температурі;

t - час обробки.

Припускаючи сталим, тобто постулюючи сталість складу, отримуємо:

$$L = L^T \cdot (1 - e^{-kt}) + L_0 \cdot e^{-kt} \quad (3.3)$$

Припустивши, що під час випуску металу із конвертера, змінення L описується аналогічним рівнянням швидкості, остаточно маємо:

$$L_t = L^T \cdot (1 - e^{-m\tau - kt}) \quad (3.4)$$

де m - коефіцієнт, залежний від технології обробки плавки у ковші під час випуску;

τ - час випускання.

Величину L^T розраховували через величину сульфідної ємкості шлаку C_s , тобто параметр, що залежить від температури та складу шлаку. Зв'язок між C_s і L описується виразом

$$\lg L^T = \lg C_s + \lg f_s - \lg a_o - \frac{785}{T} + 1277 \quad (3.5)$$

де f_s - коефіцієнт активності сірки у розплаві;

a_o - активність кисню у розплаві;

T - температура °K.

Активність кисню можна або виміряти безпосередньо, або визначити розрахунковим способом. Припускаючи, що вона контролюється реакцією окислення алюмінію, можна записати:

$$\lg L^T = \frac{20850}{T} - 5,6 + \lg C_s - \frac{1}{3} \lg a_{Al_2O_3} + \frac{2}{3} \lg a_{Al} + \lg f_s \quad (3.6)$$

де

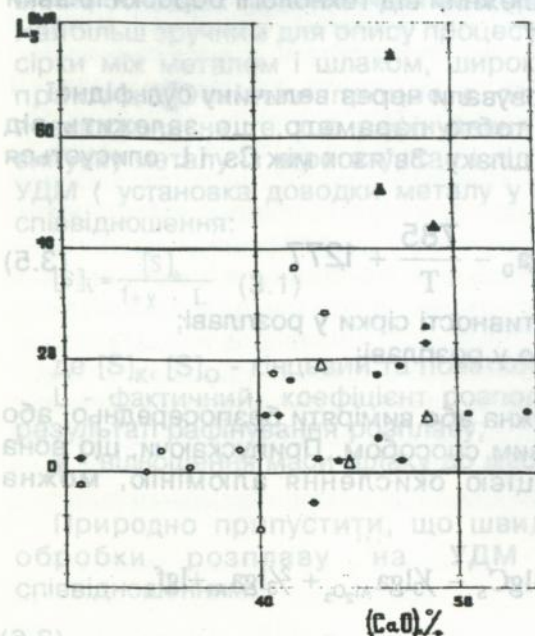
a_{Al} - активність алюмінію в металевому розплаві;

$a_{Al_2O_3}$ - активність Al_2O_3 в шлаковому розплаві.

Величину a_{Al} розраховували за методом Вагнера, а $a_{Al_2O_3}$ за методом А.Г. Пономаренка. Для визначення C_S випробували різні методики: 1 - визначення за вже отриманими і узагальненими у вигляді таблиць та графіків експериментальними даними; 2 - визначення за наявними емпіричними залежностями; 3 - за методом А.В. Куклева; 4 - через оптичну основність за методою І.Д. Сомервіля.

Зупинились на останній, як найбільш забезпеченій розрахунковими параметрами та серйозно перевірених в лабораторних та промислових умовах.

Експерименти проводили у кислево-конвертерному цеху комбінату "Азовсталь" при виплавленні металу із зниженим вмістом сірки. Сталь виплавляли у 350-тонних конвертерах за діючими технологічними інструкціями. Під час випускання металу у ківш вводили всі феросплави, наводили активний



Мал. 3.1. Залежність коефіцієнта розподілу сірки, досягнутого в процесі випуску, від вмісту (CaO) у шлаку.

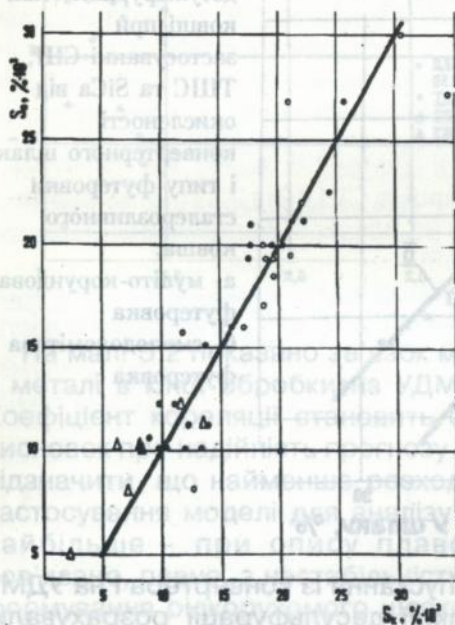
○ - плавки без обробки шлаками;

● - ТМС;

△ - СШ;

▲ - СШ+ТМС.

шлак присадками СШ у кількості 14-34 кг/т або ТШС, що складався із свіжовипаленого вапна та плавикового шпату у кількості 2,8-8,6 кг/т та 0,5-1,0 кг/т відповідно. На окремих плавках шлак формували комбінованим способом за рахунок застосування СШ у кількості 11-14 кг/т та ТШС у попередній кількості. Температура металу перед випуском із конвертера коливалась від 1650 до 1710 °С, тривалість випуску від 4,3 до 11 хвилин. На УДМ метал продували аргонем через



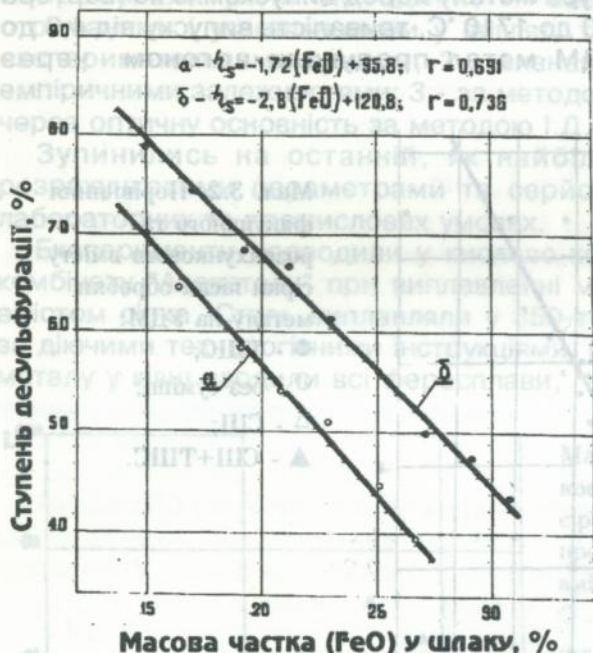
Мал. 3.2. Порівняння фактичного та розрахункового вмісту сірки після обробки металу на УДМ:
 ● - ТШС;
 ○ - без суміші;
 Δ - СШ;
 ▲ - СШ+ТШС.

занурювану фурму з внутрішнім діаметром 34-38 мм. Інтенсивність продувки змінювалась у межах 30-100 $\text{нм}^3/\text{год.}$, тривалість від 4 до 20 хвилин. Перед початком та після закінчення продувки вимірювали товщину шару шлаку у ковші. Під час продувки через кожну хвилину добирали проби металу та шлаку, вимірювали температуру металу, яка коливалась від 1550 до 1605 °С. Контролювали параметри продувки, інтенсивність подачі газу, глибину занурювання та розташування фурми.

Заздалегідь вивчили швидкість перемішування металу та

шлаку і в обробку включали тільки результати аналізу проб, добраних із повністю усереднених фаз, тобто характеризуючих склад усього металу та шлаку.

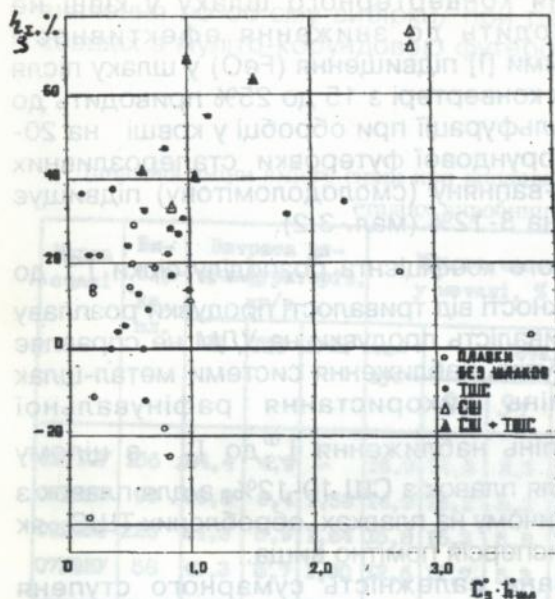
Для визначення впливу кожного етапу обробки



Мал. 3.3.

Залежність ступеня десульфурації сталі у ковші при застосуванні СШ, ТШС та SiCa від окисленості конвертерного шлаку і типу футеровки сталерозливного ковша:
 а- муліто-корундова футеровка
 б- смолодоломітова футеровка

(десульфурація в процесі випускання із конвертера і на УДМ) на сумарний результат реакції десульфурації розраховували величину фактичного коефіцієнта розподілу в системі шлак-метал, досягнутого внаслідок випуску, припускаючи, що метал по вмісту сірки відразу після закінчення випуску однорідний, і нехтуючи виділенням сірки у газову фазу. На мал. 3.1 показана залежність L_s від вмісту CaO у ковшовому шлаку перед початком обробки на УДМ. Видно, що ефективність процесу десульфурації зростає в міру зростання вмісту CaO, причому дані для всіх плавов, у т.ч. і для плавов без використання шлакоутворюючих сумішей, підпорядковані одній закономірності. Особливо швидко L_s зростає при вмісті CaO більше 45%.



Мал. 3.4. Вплив величини $C_{s \cdot h}$ на сумарний ступінь десульфурації.

На мал. 3.2 показано зв'язок між фактичним вмістом сірки у металі в кінці обробки на УДМ та розрахованим за (3.4). Коефіцієнт кореляції становить 0,82, що дозволяє зробити висновок про надійність прогнозу по розробленій моделі. Слід відзначити, що найменше розходження отримане у випадку застосування моделі для аналізу плавов, оброблених СШ, а найбільше - при опису плавов з обробкою ТШС. Це пов'язано, певне, з нестабільністю процесів плавлення ТШС і формування рідкорухомого шлакового розплаву у ковші при випуску.

Відомо, що ефективність десульфурації в значній мірі визначається рівнем окислювального потенціалу системи шлак-метал в процесі обробки. На практиці мінімальний рівень окисленості може бути забезпечений за рахунок виключення передуву металу у конвертері, ретельного відсікання конвертерного шлаку, оптимального режиму розкислення сталі алюмінієм та основною футеровкою сталерозливних ковшів. В зв'язку з тим, що на цей час відсутні методи механізованої відсічки шлаку, повністю

виключити попадання конвертерного шлаку у ківш не вдається. Це призводить до зниження ефективності десульфурації. За даними [1] підвищення (FeO) у шлаку після закінчення продувки в конвертері з 15 до 25% приводить до зниження ступеня десульфурації при обробці у ковші на 20-25%, а заміна муліто-корундової футеровки сталерозливних ковшів на перикладно-вапняну (смолодоломітову) підвищує ступінь десульфурації на 8-12% (мал. 3.2).

Відношення фактичного коефіцієнта розподілу сірки L_s^{Φ} до розрахункового в залежності від тривалості продувки розплав газом показало, що тривалість продувки на УДМ не справляє помітного впливу на ступінь наближення системи метал-шлак до рівноваги. Ступінь використання рафінувальної властивості, тобто ступінь наближення L_s^{Φ} до L_s^T в цілому невелика і становить для плавок з СШ 10-12%, а для плавок з ТШС - 6,5% [14, 15]. Причому на плавках, оброблених ТШС, як відзначалось раніше, дисперсія помітно вища.

На мал. 3.4 показана залежність сумарного ступеня десульфурації у ковші від величини $C_s \cdot h$, де C_s - сульфідна ємкість ковшового шлаку, h - товщина шару шлаку у ковші перед початком обробки на УДМ. Величина C_s є інтенсивною властивістю шлакового розплаву, залежного тільки від параметрів системи - температури та складу, в той час, як $C_s \cdot h$ є екстенсивною властивістю і характеризує можливість шлаку поглинати сірку із металу. Видно, що при існуючій схемі обробки ступінь десульфурації не перевищує 80%, причому особливо швидко він зростає при $C_s \cdot h > 1$, а при значеннях більше 1,5 стабілізується на рівні біля 75%. Регулювати величину $C_s \cdot h$ можна як за рахунок змінювання маси шлаку, так і його сульфідної ємкості.

З врахуванням висновків, сформульованих вище, у конвертерному цеху комбінату "Азовсталь" відпрацьована та впроваджена економічна комбінована технологія глибокої десульфурації сталі у ковші рідким СШ у кількості 25-32 кг/т та ТШС - 5-6 кг/т. Покривні ковшові шлаки, сформовані таким способом, мають вміст СаО після випуску плавки із конвертера на рівні 47-52%, а середній ступінь десульфурації становить близько 70%. У табл. 3.1 наведені узагальнені дані про динаміку змінювання вмісту сірки у металі /середні

СаО більше 45%.

значення по об'єму вибірки/ при реалізації цієї технології у ковшах з муліто-корундовою футеровкою [1].

Таблиця 3.1

Динаміка зміни вмісту сірки при виплавці трубних сталей на різних стадіях виробництва

Марка сталі	Вибір-ка, пл.	Витрата де-сульфураторів, кг/т				Масова частка сірки у металі, % · 10 ³						Ступінь де-сульфурації, %		
		СШ	ТДС	S/Ca	ча-сун	сталь №						ℓ _{S1}	ℓ _{S2}	ℓ _{S_{мет.}}
						S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄				
ІЗГІСУ	І56	24,4	4,9	-	І6,9	І4,8	8,3	8,0	7,6	6,6	43,9	45,9	55,4	
09Г2БВ	90	30,8	6,4	І,58	І4,9	І5,І	6,3	5,8	5,7	5,0	58,3	6І,6	66,9	
09Г2ВГ	220	3І,3	5,9	І,64	І5,8	І6,3	5,8	5,2	5,2	4,6	64,4	68,І	7І,8	
07Г2ВУ	58	40,3	5,7	І,90	І2,6	І2,7	5,3	4,5	4,2	3,5	58,3	64,6	72,4	

* - S₀, S₁, S₂, S₃ та S₄ - вміст сірки у металі перед випуском із конвертера, перед усередненням на УДМ, після усереднення на УДМ, після закінчення доводки металу на УДМ, у готовій сталі /за ковшовою пробов/ відповідно;

$$\text{де: } \ell_{S1} = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100, \ell_{S2} = \frac{S_0 - S_2}{S_0} \cdot 100, \ell_{S_{\text{мет.}}} = \frac{S_0 - S_4}{S_0} \cdot 100$$

3.2. ДЕСУЛЬФУРАЦІЯ МЕТАЛУ НА УДМ.

Дані таблиці 3.1 підтверджують, що безпосередньо в процесі обробки сталі на УДМ, у тому числі при обробці сталі силікокальцієм, додаткова ресульфурация відбувається незначно. Це пов'язано з недостатньою інтенсивністю перемішування металу та шлаку. При видержці металу у ковші після обробки і в процесі розливки спостерігається деяке додаткове зниження вмісту сірки у металі, що очевидно пов'язане з спливанням сульфідних включень.

Проведені нами дослідження показали, що помітна

додаткова десульфурація металу безпосередньо при обробці порошкоподібним силікокальцієм у кількості 1,5-2,0 кг/т, вдваним у струмені аргону через занурювану футеровану фурму, забезпечується тільки при умові отримання перед обробкою вмісту закису заліза у ковшовому шлаку не більше 0,8% і алюмінію у металі не менше 0,035-0,040%. В цьому випадку додаткове зниження вмісту сірки може досягати 0,001-0,003%, а загальний ступінь десульфурації 70-80%. Ефективність застосування силікокальцію як десульфуратора і модифікатора зростає при застосуванні ковшів з основною футеровкою [1, 23].

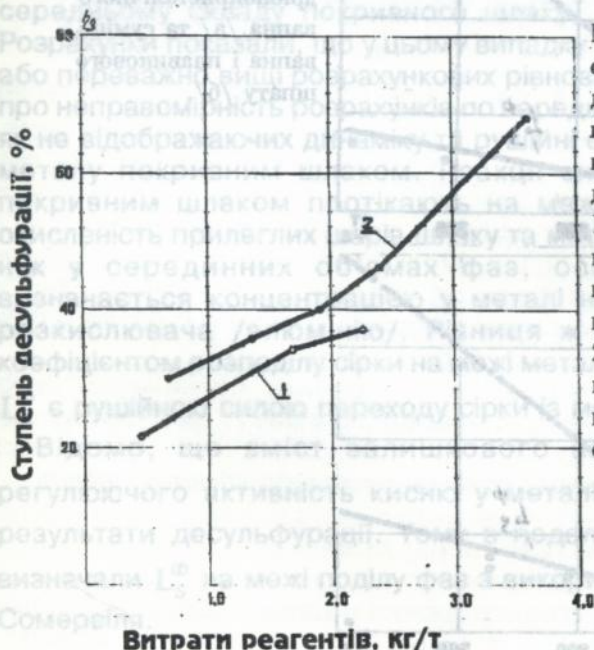
Важливою перевагою технології модифікування порошкоподібним силікокальцієм є поліпшення розливальності алюмініємістних сталей на МНЛЗ, що виявляється в зниженні затягування розливних стаканів основного та проміжного ковшів. Дослідження виявили, що схильність до затягування стаканів в значній мірі визначається співвідношенням рідких та твердих включень у розплаві. Встановлено, що для хорошої розливальності вміст кальцію та алюмінію повинен задовольняти залежності $[Ca] > 0,1 [Al]$, що забезпечує утворення алюмінатів кальцію евтектичного складу. Тому при виробництві низькосірчастих сталей, модифікованих кальцієм, особливо важливо проводити ретельний захист струменя металу від вторинного окислення на усіх етапах розливки.

Один з найбільш ефективних та перспективних напрямів позапічної десульфурації сталі пов'язаний з використанням порошкоподібних сумішей на основі вапна та плавикового шпату.

Нижче наведені результати наших досліджень [15,16,17,18] (робота виконана сумісно з доцентом Черевко В.П.) та відпрацювання технології десульфурації сталі у ковшах на УДМ конвертерного цеху комбінату "Азовсталь" порошкоподібним кристалічним вапном та його сумішшю з плавиковим шпатом /у співвідношенні 4:1/, інjektуємими у метал після звичайної усереднювальної продувки аргонem. Витрати порошкоподібного вапна або суміші на його основі становили 0,38-3,57 кг/т металу, хвилинна витрата 60-100 кг, транспортуючого газу 0,7-1,3 м³ /хв /40-80 м³ /год/. Вміст сірки після усереднювальної продувки металу аргонem -

0,016-0,022%. Метал розкислений алюмінієм з залишковим вмістом [Al] порядку 0,030%. Обробляли вуглецеву сталь 3сп., низьколеговану ІОХСНД, І7ГІСУ. Склад покривного шлаку у ковші після усереднювальної продувки в залежності від джерел його формування характеризувався наступними концентраціями: $\text{CaO}=40-49$, $\text{MgO}=3-10$, $\text{Al}_2\text{O}_3=8-32$, $\text{SiO}_2=7-12$, $\text{MnO}=0,2-3$, $\text{FeO}=1,2-5\%$.

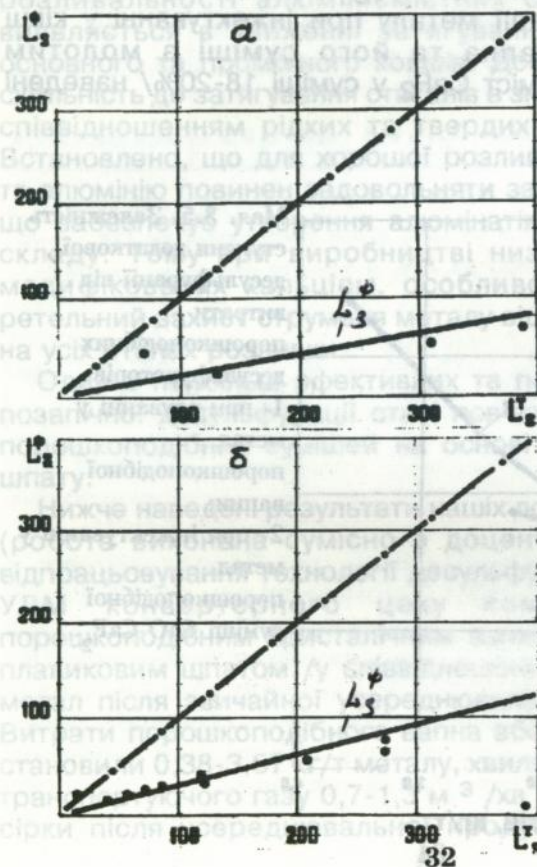
Порошкоподібне активне вапно, застосоване як десульфуратор або компонент шлакоутворюючої суміші, отримане за спеціальною технологією, розробленою Державною металургійною Академією України. Його відзначними особливостями є висока дисперсність частинок, дрібнозерниста структура, стійкість до гідратації. Склад вапна такий: $\text{CaO}+\text{MgO} > 90-92\%$, $\text{SiO}_2 < 2-4\%$, п.п.п $< 2-4\%$. Показники десульфурації металу при інжектуванні у ківш порошкоподібного вапна та його суміші з молотим плавиковим шпатом /вміст CaF_2 у суміші 18-20%/ наведені на мал. 3.5.



Мал. 3.5. Залежність ступеня додаткової десульфурації від витрати порошкоподібних десульфураторів. 1- при вдуванні у метал порошкоподібної вапни; 2- при інжектуванні у метал порошкоподібної суміші $\text{CaO}-\text{CaF}_2$.

Як видно, наслідки продувки металу порошкоподібним вапном або сумішами на його основі дуже ефективні, що пояснюється високою реакційною властивістю вапна, частинки якого є переносниками сірки від металу до шлаку, та його впливом на склад покривного шлаку, ступінь використання його рафінувальних властивостей.

Раніше показано, що перемішування металу аргонем на УДМ в великовантажних ковшах не дає помітного додаткового ефекту десульфурації сталі, тому результати знесірчення на УДМ отримані можливо за рахунок безпосередньої участі порошкоподібного вапна або сумішей на його основі в процесі обробки металу.



Мал. 3.6. Співвідношення розрахункового та фактичного коефіцієнтів розподілу сірки при вдуванні дрібнокристалічного вапна /а/ та суміші вапна і плавикового шпату /б/.

Для визначення теоретичного рівноважного коефіцієнта розподілу сірки L^T у системі покривний шлак - метал використали іонну теорію і в основному сучасну методику розрахунку L^T через сульфідну ємкість шлаку C_s /рівняння 3.5 та 3.6/. Визначення сульфідної ємкості шлаку C_s здійснено за добре зарекомендованою методикою І.Д.Сомервіля з використанням поняття та величин оптичної основності шлакового розплаву. За даними Сомервіля

$$\lg C_s = \frac{22690 - 54640\lambda}{T} + 43,6\lambda - 252 \quad /3.7/$$

Фактичний коефіцієнт розподілу L^Φ визначали із балансу сірки

$$[S]^H + 0,01M^{шл.}(S)^H = [S]^K \cdot (1 + 0,01L_s^\Phi \cdot M^{шл.}) \quad /3.8/$$

де $[S]^H$, $[S]^K$, $(S)^H$ - відповідно початковий та кінцевий вміст сірки у металі і початковий вміст сірки у шлаку, %;

M - маса покривного шлаку, % від маси металу.

Спочатку визначили рівноважні коефіцієнти розподілу сірки за іонною теорією та методикою сульфідної ємкості, відповідні середньому складу покривного шлаку $/FeO=1,2-1,5\%/$. Розрахунки показали, що у цьому випадку фактичні L_s сумірні або переважно вищі розрахункових рівноважних, що свідчить про неправомірність розрахунків по середньому складу шлаку як не відображаючих динаміку та рушійні сили десульфурації металу покривним шлаком. Реакції знесірчення металу покривним шлаком протікають на межі метал-шлак, де окисленість прилеглих шарів шлаку та металу значно менша, ніж у серединних об'ємах фаз, особливо шлаку, і визначається концентрацією у металі найбільш сильного розкислювача /алюмінію/. Різниця ж між рівноважним коефіцієнтом розподілу сірки на межі метал-шлак і фактичним

L_s^Φ є рушійною силою переходу сірки із металу в шлак.

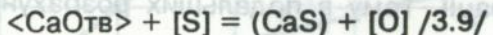
Відомо, що вміст залишкового алюмінію у сталі, регулюючого активність кисню у металі, визначає L_s^Φ та результати десульфурації. Тому в подальших розрахунках визначали L_s^Φ на межі поділу фаз з використанням методики Сомервіля.

Активність кисню у металі розраховували по рівновазі з алюмінієм. Активність глинозему у пограничному шарі шлаку визначали з врахуванням перебігу реакцій метал-шлак. При цьому вміст Al_2O_3 в пограничному шарі шлаку трохи вищий, ніж у серединних об'ємах, але нижчий, ніж у рівновазі в продуктах зазначених реакцій окислення алюмінію.

Розрахунки показали, що у пограничному шарі шлаку активність Al_2O_3 значно нижча 1 і становить близько 0,1, при цьому активність кисню у металі в зоні фронту реакції десульфурації знижується до дуже низьких значень, збільшуючи сіркопоглинальну здатність шлаку, контактуючого з металом. Покривний же шлак має досить високу сульфідну ємкість і тому приймає потік сірки, що надходить із металу.

На мал. 3.6 наведені співвідношення величини фактичного та теоретичного коефіцієнтів розподілу сірки L_s^{Φ} / L_s^T для системи покривний шлак-метал. При обробці металу порошкоподібною шлакоутворюючою сумішшю CaO-CaF_2 система дещо ближча до рівноваги, ніж продувці тільки порошкоподібним вапном, і у середньому ступінь наближення відповідно становив $L_s^{\Phi} = 0,24 L_s^T$, $r = 0,58$ /мал. 3.6а/ та $L_s^{\Phi} = 0,21 L_s^T$, $r = 0,88$ /мал. 3.6б/. При цьому у цілому ступінь наближення до рівноваги по сірці системи покривний шлак-метал при обробці сталі на УДМ виявився нижчим, ніж при обробці металу в процесі випуску плавки з одночасною продувкою порошкоподібним вапном, що пояснюється, в другому випадку, більш високою питомою інтенсивністю переміщування металу та шлаку. Встановили, що з підвищенням концентрації алюмінію у сталі з 0,02 до 0,05% ступінь десульфурації зростає у 1,5 рази [17].

Для оцінки імовірної частки впливу поглинання сірки частинками вапна у сумарному ефекті десульфурації здійснили розрахунки з використанням методики М.Я.Меджибожського, який припускає протікання реакції



на поверхні тонкодисперсних частинок CaO . В процесі десульфурації металу порошкоподібним вапном $\langle \text{CaO}_{\text{тв}} \rangle$

поточна концентрація сірки $[S]^k$ визначається її початковим рівнем $[S]^H$, ступенем завершеності дифузійних процесів $[1-\Theta]$, коефіцієнтом розподілу сірки на межі частинка-метал L_s^H , витратою вапна $-m_H$, вмістом сірки у вапні $-Si$.

$$[S]^k = [S]^H - S_H / L_s^H \exp\{-0,001 (1 - \Theta) \cdot L_s^H \cdot m_H\} + \frac{S_H}{L_s^H} \quad /3.10/$$

Імовірний коефіцієнт розподілу сірки L_s^H визначено з врахуванням розчинності та активності CaS в CaO та активності кисню у металі, регламентованою вмістом алюмінію. При цьому допущено, що $a_{Al_2O_3}$ дорівнює 1.

Ступінь завершеності дифузійних процесів за участю порошкоподібного вапна з врахуванням розміру частинок та імовірного часу їх перебування в об'ємі металу оцінили величиною - 0,6, а у випадку обробки металу порошкоподібною сумішшю $CaO-CaF_2$ - 0,8. Згідно з розрахунками, частка сірки, виведеної порошком вапна та частинками суміші становила близько 37 та 61%.

Видно, що значна частка сірки, виведеної в процесі продувки металу порошкоподібним вапном або його сумішшю з плавиковим шпатом, припадає на покривний шлак. Це зумовлено впливом вдуваних частинок на інтенсифікацію перемішування металу і покривного шлаку, поліпшенням складу та станом останнього.

Оцінені можливі наслідки десульфурації на УДМ при введенні суміші до 5-6 кг/т сталі. Ступінь десульфурації металу у цьому випадку становить не менше 70%. Таким чином, можна повністю відмовитись від застосування синтетичного шлаку при виплавці низькосірчастих сталей.

4. ДОПОМІЖНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РІШЕННЯ.

Досліджена можливість допалювання окису вуглецю в 350-т конвертерах за рахунок застосування фурм з центральним соплом та з завихрювачами у соплах. Застосування таких фурм супроводжувалось додатковим надходженням тепла за рахунок допалювання CO без

негативного впливу на футеровку конвертера. Впровадження нових фурм дозволило на 30% скоротити кількість плавок з переокисленням кінцевим шлаком та на 10 кг/т сталі знизити питому витрату металошихти [20].

Розроблена та впроваджена технологія розкислення сталі гранульованим та фракціонованим алюмінієм у ковші. Встановлено, що перехід на використання гранул та дрібних кусків розміром 5-15 мм, замість стандартних та звичайно застосовуваних чушок масою 12-16 кг, забезпечує підвищення засвоєння алюмінію металом в 1,5-2,0 рази, механізацію введення розкислювача у ковш без підвищення газонасиченості [21].

Розроблена технологія виплавки низьколегованих сталей масового призначення марок 09Г2С, ІЗГІСУ та І7ГІСУ у 350-т конвертерах з використанням рідких лігатур та позапічного рафінування. Порівняно з раніше застосовуваною технологією з застосуванням твердих феросплавів вона дозволила знизити температуру металу перед випуском на 30 °С і відповідно знизити угар марганцю та кремнію на 3,5% та 7,0% абс., знизити вміст сірки у готовій сталі на 0,002-0,005%. При цьому значно поліпшилась екологія процесу розкислення [22].

Розроблена та впроваджена технологія диференційованої футеровки 350-т сталерозливних ковшів термообробленими периклазовапняними /основними/ вогнетривами на смоляній /пековій/ зв'язці [23]. Використання таких вогнетривів замість дорогих муліто-корундових набивних футеровок дозволило в 2,0-2,5 рази підвищити стійкість футеровки сталерозливних ковшів, знизити питомі витрати на вогнетриви. Застосування сталерозливних ковшів з основною футеровкою підвищило ефективність рафінування сталі у ковші, особливо по сірці, забезпечило економію марганцемістних сплавів та алюмінію [23].

Для підвищення стійкості сталерозливних ковшів з основною та високоглиноземною футеровкою впроваджена схема високотемпературної /не менше 800 °С / їх експлуатації. Впровадження зйомної теплоізолюючої футерованої кришки при розливанні сталі поліпшило її розливальність і зменшило кількість безперервнолитих слябів з поверхневими дефектами [24].

Розроблена та впроваджена технологія коригування хімічного складу на УДМ при виробництві вуглецевої та низьколегованої сталі, що забезпечило отримання металу з вузькими границями вмісту основних елементів /близьких до верхніх марочних границь/ і підвищеними на 20-50 МПа міцностними властивостями готового прокату [25].

Методом "холодного" моделювання встановили [26], що високошвидкісна продувка рідини надзвуковим $Ma > 1$, фігурним /щілинним/ струменем дозволяє значно збільшити глибину проникання струменю у рідину, зменшити розміри пазирів у ній, знизити висоту сплесків у 1,3-1,7 рази, підвищити ступінь розосередження пазирів у рідині. Результати досліджень використані при створенні промислових фурм і технології високошвидкісної продувки сталі в 350-т ковшах на УДМ конвертерного цеху комбінату "Азовсталь". Це забезпечило збільшення витрати газу на продувку з 50-60 до 120-140 м³ /год при зниженні висоти виплесків металу у ковші, скоротило на 25% тривалість усереднювальної продувки при високому ступені однорідності розплаву за хімічним складом та температурою [27].

Проведено дослідження і встановлено ступінь впливу хімічного складу та газонасиченості сталі /сталь 09-10Г2ФБ, 10Г2БТ та ін./ перед розливкою на МНЛЗ на якість осьової зони штрипсу для газопровідних труб великого діаметру. Показано негативний вплив сірки, форфору, вуглецю і наявності водню на можливість утворення та протяжність мікротріщин типу флокенів в осьовій зоні [28].

Проведено комплекс робіт по вибору раціональних технологічних схем модифікування та мікролегування сталей відповідального призначення. Показано, що вдудання на УДМ порошкоподібних сумішей силікокальцію, РЗМ та силікомагнію сприяє додатковому видаленню сірки і більш повній глобуляризації сульфідних включень, що забезпечує підвищення низькотемпературної ударної в'язкості [29]. Аналогічний ефект при виробництві титанопомістких трубних сталей спостерігається при використанні як модифікатора сумішей силікокальцію та феросилікоцирконію [30]. При цьому, за рахунок зв'язування азоту у міцні нітриди цирконію, забезпечується більш ефективне використання зміцнюючого ефекту карбідів титану. Застосування технології

модифікування та мікролегування сталі кальцієм [34], титаном та бором [35] дозволяє не тільки модифікувати неметалеві включення, але й знизити рівень хімічної та структурної неоднорідності в осьовій зоні безперервнолитих слябів. Досліджена можливість і розроблені рекомендації по підвищенню якості осьової зони товстолистого прокату і економії енергоресурсів при гарячому посаді безперервнолитих слябів низькосірчастих сталей у нагрівальні печі стану "3600" [33].

Відзначимо, що розроблені та розглянуті у розділах 1-4 технології забезпечують повну підготовку рідкого металу до розливки на МНЛЗ.

5. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТУПЕНЯ РАФІНУВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ТА СЛУЖБОВІ ВЛАСТИВОСТІ ТОВСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ. ОДЕРЖАННЯ МЕТАЛУ ОСОБЛИВО ВИСОКОЇ ЯКОСТІ

Використання високоміцних сталей в усіх галузях народного господарства є найбільш ефективним напрямом, що забезпечує підвищення надійності виробів при одночасному зниженні металомісткості.

Глибока десульфурція та рафінування сталі від неметалевих включень є одним з найбільш ефективних технологічних заходів, справляючих позитивний вплив практично на весь комплекс властивостей товстолистого прокату. Особливо сильно він виявляється у підвищенні низькотемпературної в'язкості та холодостійкості, зниженні анізотропії властивостей у напрямку товщини листа, підвищенні зварювальності, корозійної стійкості та втомної міцності.

Більшість сталей масового призначення використовуються в гарячекатаному стані. Через високу температуру закінчення деформації при гарячій прокатці для них є властивим достатньо крупне зерно фериту, розмір якого в кінцевому підсумку є лімітуючим структурним фактором, що визначає комплекс механічних властивостей готового прокату при

даному ступені легування. Тому другим ефективним напрямом підвищення якості товстолистового прокату є застосування термічної або термодеоформаційної обробки, що призводять до подрібнення зерна фериту, зміні співвідношення та розмірів структурних складових.

Дослідження оцінки ступеня впливу позапічної обробки на збрудненість сталі неметалевими включеннями здійснювали на порівняльних /02-0,03% S/ та дослідних /0,001-0,008% S/ плавках низьколегованих сталей різного призначення. Дослідження показали, що спосіб десульфурації у ковші /СШ, ТШС або їх комбінація/ не справляє значного впливу на забрудненість сталі неметалевими включеннями. Основними типами неметалевих включень у промислових плавках поточного виробництва /вміст сірки 0,020-0,030%/ є крихкозруйновані силікати, рядкові включення глинозему та пластичні сульфідні типу /Mn, Fe/ S, орієнтовані у напрямку прокатки. Розмір включень коливається від 15 до 120 мкм. Максимальне скупчення включень, як правило, спостерігається з боку малого радіусу на глибині 3-5 мм. Індекс забруднення металу включеннями коливається від $2,5 \cdot 10^{-3}$ до $7,5 \cdot 10^{-3}$. Для металу низькосірчастих плавко, оброблених силікокальцієм, характерні неметалеві включення глобулярної та неправильної форми: оксисульфідні /однофазні, двофазні, багатофазні/, алюмінати кальцію глобулярної форми з сульфідною оболонкою та без неї, нітриди /карбонітриди/ титану. Більша частина алюмінієвих кальцію має розмір 3-8 мкм і лише окремі включення досягають 15-20 мкм. Алюмінати кальцію і недеформовані сульфідні мають рівномірний розподіл. При вмісті сірки у металі більше 0,005% в осевій зоні спостерігаються нитковидні включення пластичних сульфідів типу /Mn, Fe/ S, що свідчить про недостатньо повне завершення процесу модифікування. Загальний індекс забруднення включеннями низькосірчастих модифікованих сталей не перевищує $1,3 \cdot 10^{-3}$ [1, 37, 38].

Механічні властивості товстолистового прокату досліджували в лабораторних та промислових умовах на низьколегованій сталі марки 09Г2С [37] різного призначення з вмістом сірки на 2 рівнях: першому - відповідному вмісту сірки у металі масового виробництва /0,020-0,030%/ і

Таблиця 5.1

Механічні властивості рафінованої сталі 09Г2С

Після гарячої прокатки			Після нормалізації			Після контрольованої прокатки			Після контрольованої прокатки і прискореного охолодження.		
σ_B	σ_T	δ_5	σ_B	σ_T	δ_5	σ_B	σ_T	δ_5	σ_B	σ_T	δ_5
Н/мм ²	Н/мм ²	%	Н/мм ²	Н/мм ²	%	Н/мм ²	Н/мм ²	%	Н/мм ²	Н/мм ²	%
510	360	30	520	380	30	520	390	28	540	410	26
530	375	31	510	380	31	530	405	32	540	420	25

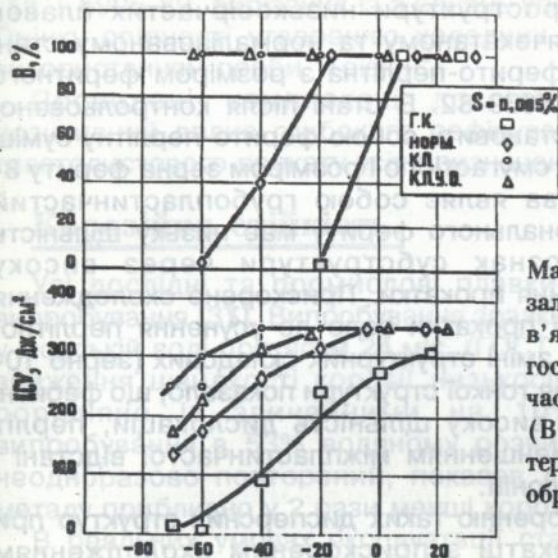
другому -відповідному рівню, забезпеченому розробленою комплексною технологією десульфурації /0,001-0,008%/.

Механічні властивості вивчали на поперечних зразках; на розтяг випробували круглі п'ятикратні зразки по ГОСТ 1497-84. Ударну в'язкість визначали на зразках з гострим та круглим надрізом по ГОСТ 9454-78.

Сляби перерізом 300x1850 мм прокатувались на листи товщиною 14 та 18 мм по звичайним режимам гарячої прокатки з наступною нормалізацією у потоку; по режимам контрольованої прокатки; по режимам контрольованої прокатки з наступним прискореним охолодженням.

Температура нагріву під прокатку в усіх випадках становила 1160-1180 °С. Прокатку в чорновій кліті завершували при 960-980 °С. Прокатку по контрольованим режимам у чистовій кліті проводили при температурі закінчення деформації 800-820 °С. При контрольованій прокатці з прискореним охолодженням температура закінчення деформації становила 820-840 °С, температура закінчення прискореного охолодження коливалась від 620 до 670 °С.

Контрольована прокатка та контрольована прокатка з прискореним охолодженням у порівненні з гарячекатаним та нормалізованим станом підвищують міцностні



Мал. 5.1. Температурна залежність ударної в'язкості на зразках з гострим надрізом (KCV) та частки в'язкої складової (В) від режимів термодформаційної обробки.

характеристики сталі 09Г2С /табл. 5.1/: тимчасовий опір на 20-30 Н/мм², а границю текучості на 30-40 Н/мм². У стані після контрольованої прокатки з прискореним охолодженням спостерігається деяке зниження відносного здовження.

Ударна в'язкість при низьких температурах низькосірчатої сталі на зразках з гострим надрізом, крім гарячекатаного стану, перебуває на дуже високому рівні /мал. 5.1/: при -60 °C KCV змінюється від 180 Дж/см² /для нормалізованого стану/ до 280 Дж/см² /для стану контрольованої прокатки/. Проте, тільки у стані контрольованої прокатки і контрольованої прокатки з прискореним охолодженням сталь має холодостійкість -зберігається повністю в'язкий злом до температури -70 °C /частка в'язкої складової у злому більше 85%/. В нормалізованому стані, незважаючи на високі значення ударної в'язкості, критична температура крихкості T50 становить -30 °C, в гарячекатаному стані - 0 °C. Це добре корелює зі значеннями в'язкості руйнування Kісз, визначеними при -196 °C для гарячекатаного, нормалізованого і стану контрольованої прокатки - 140, 170 та 220 МПа, відповідно.

Дослідження мікроструктури низькосірчастих плавок показало, що в гарячекатаному та нормалізованому стані структура металу є ферито-перлітна з розміром феритного зерна 7-8 по ГОСТ 5639-82. В стані після контрольованої прокатки структура становить собою ферито-перлітну суміш з яскраво виявленою смугастістю і розміром зерна фериту 8-9. Перлітна складова являє собою грубопластинчастий перліт. Зерно полігонального фериту має низьку щільність дислокацій, без ознак субструктури через високу температуру закінчення прокатки. Прискорене охолодження після контрольованої прокатки веде до усунення перлітної смугастості і значній зміні структурних складових (зерно 10-11 балів). Дослідження тонкої структури показало, що феритні зерна мають більш високу щільність дислокацій, перліт характеризується зменшенням міжпластинчастої відстані і розміру перлітних колоній.

Саме завдяки утворенню таких дисперсних структур при контрольованій прокатці з прискореним охолодженням рафінованих сталей забезпечується одержання унікального комплексу властивостей: підвищення границі текучості і різке підвищення низькотемпературної в'язкості при одночасному зниженні критичної температури крихності.

Зварюваність.

Негативний вплив підвищеного вмісту сірки на розтріскування листової сталі при повторних нагрівах, в пришовній зоні при зварюванні, в значній мірі пояснюється присутністю сульфідів, які при температурах 1150-1300 °C розчиняються в аустеніті і при наступному охолодженні випадають по границям зернин, ослаблюючи міжкристалічні зв'язки, що полегшує утворення кристалізаційних та холодних тріщин. При вмісту сірки (0,003-0,006%) виділення сульфідів із аустеніту не спостерігається.

Дослідження впливу термічних циклів зварювання на твердість та схильність до крихного руйнування металу пришовної зони низькосірчастої сталі марки 09Г2С оцінювали методом валикової проби по ГОСТ 13585-66. Міцність зварних з'єднань визначали випробуваннями на розтягання повнотовщинних плоских зразків зварних з'єднань типу 2 по

ГОСТ 6996-89, вирізаних із з'єднань упоперек зварних швів. Оцінку опірності утворенню холодних тріщин визначали з використанням проби "Теккен".

Проведені комплексні дослідження підтвердили позитивний вплив глибокого рафінування на зварюваність товстолистового прокату усіх призначень [38].

Корозійна стійкість.

Усі дослідні та промислові плавки пройшли корозійні випробування [38]. Випробування зразків на загальну корозію у морській воді протягом 24 міс. (ГОСТ 177322-71) показали зниження швидкості корозії низькосірчатої сталі 09Г2С порівняно із звичайними на 10%. Експрес-метод випробування в 53% водяному розчині сірчаної кислоти, неодноразово повторений, показав для низькосірчастого металу приблизно у 2 рази менші корозійні втрати.

В реальних умовах експлуатації сталь під напруженням силових навантажень більш активно взаємодіє з агресивним середовищем, що прискорює процеси корозії. Тому більш вагомими є показники корозійно-механічної міцності. Випробування проводили в умовах деформації зразків при заданій швидкості навантажування $E = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$ в різних агресивних середовищах. Аналіз цих випробувань, більш повно відображаючий ефект Ребіндера, показав, що коефіцієнт впливу середовища ($\alpha_{\text{ср}}$) істотно залежить від вмісту сірки та природи включень в сталі. В випробних плавках з низьким вмістом сірки (менше 0,005%) і глобулярними недеформованими включеннями алюмінієвих кальцію та сульфідів, коефіцієнт впливу середовища в 2-8 разів був нижчий, ніж у промислових плавках з орієнтованими включеннями сульфідів та рядків глинозему.

Сірководнева стійкість.

Дослідження проводили на низькосірчатої (менше 0,004%) низьколегованій сталі марки 14ГБ. Водневе закрихчення вивчали методом електролітичного наводнювання в 0,1 нормальному розчині сірчаної кислоти з тіосечовиною (1,5 г/л). Густина катодного струму була 50 ма/см².

Визначали час до зруйнування безперервно наводнюваних зразків та порогові напруження, при яких випробні зразки не руйнувались. За базу випробувань прийняли 720 год.

За методикою NACE оцінювали стійкість до сульфідного корозійного розтріскування під напруженням, що становило 0,6-0,8 від границі текучості і схильність до індукційованого водневого розтріскування (HIC). Поряд з тривалими, проводили прискорені випробування по Перкінсу. Вони полягали в визначенні часу до зруйнування зразків, безперервно розтягуваних у розчині NACE з малою швидкістю деформування ($E = 10^{-5} \text{с}^{-1}$).

Дослідження показали, що опір водневому та сульфідному розтріскуванню під напруженням сильно залежить від чистоти сталі. Це пов'язано з різким зниженням здатності сталі поглинати водень при підвищенні чистоти сталі по неметалевим включенням. Додаткове модифікування сталі SiCa, за рахунок подрібнення оксисульфідів, призвело до зростання стійкості (часу до зруйнування) в 3-4 рази. Порогові напруження при електролітичному наводнюванні також збільшились з 0,7-0,75 границі текучості до 0,9. Максимальні значення порогового напруження були досягнені для зразків з оптимальною мікроструктурою (контрольована прокатка з наступним прискореним охолодженням). Час до зруйнування усіх зразків сталі, модифікованої SiCa, перевищував 720 год., при пороговому напруженні більше 0,8 границі текучості.

На усіх досліджуваних зразках коефіцієнти довжини (CRL) і товщини (CRL) відповідали потрібному рівню - 0%.

Таким чином, глибоко десульфурована сталь, модифікована силікокальцієм, може ефективно використовуватись при виробництві труб та устаткування, працюючого у сірководневих середовищах.

Комплексна оцінка впливу ступеня рафінування та термічної обробки на показники механічних та службових властивостей товстолистового прокату дозволила оцінити потенційні можливості підвищення якості металопродукції, уточнити та оптимізувати технологію її виробництва, визначити додаткові галузі застосування сталі підвищеної якості. З використанням результатів досліджень розроблені технічні умови на товстолистовий прокат із рафінованої низьколегованої сталі для виготовлення устаткування,

працюючого в сірководневих середовищах. Низьколеговані холодностійкі сталі підвищеної якості рекомендовані до використання в зварних металоконструкціях і устаткуванні особливо відповідального призначення, працюючих в умовах півночі: сталь 09Г2СУ (ТУ 14-1-3435), сталь 10ХСНД (ТУ 14-1-4842). Технологічні результати досліджень ефективно використовуються при розробці складу і технології виробництва високоміцних трубних сталей для магістральних газопроводів північного виконання.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Розроблено теоретичні основи і комплекс технологій виплавки металу у великовантажних 350-т конвертерах, обробки його у ковшах, що забезпечили значне ресурсозаощадження і виробництво високоякісного товстолистого прокату для виробів відповідального призначення.

2. Встановлено основні термодинамічні і кінетичні закономірності десульфурзації чавуну магнієм та його засвоєння металом. На основі цього розроблена та впроваджена раціональна технологія обробки чавуну магнієм, що забезпечує кінцевий вміст сірки у металі до 0,002% і високий ступінь засвоєння магнію 75-90%.

3. Сформульовано наукові основи і розроблено технологію виплавки у великовантажних конвертерах високоякісного металу для товстого листа (з дуже низькими вмістами сірки, фосфору, азоту і кисню), що застосовуються у виробах відповідального призначення. Уперше в Україні в конвертерах містністю 350 т освоєно раціональну комплексну технологію одержання первородної особливо чистої сталі на основі використання у шихті обкотишів з високим ступенем металізації і спеціальних заходів поліпшення шлакоутворення.

4. Встановлено основні термодинамічні і кінетичні особливості десульфурзації сталі при випуску її в великовантажні сталерозливні ковші у комплексі з обробкою рідким вапняно-глиноземистим синтетичним шлаком і кусковими ТШС на основі вапна та плавикового шпату, а також на УДМ при застосуванні порошкоподібного силікокальцію. Показано, що термодинамічні можливості десульфурзації сталі покривним шлаком при випуску металу у

ківш використовуються недостатньо (на 7-12%). Разом з тим, при застосуванні розробленої технології досягається ступінь десульфурації до 70-75% (при використанні ковшів з основною футеровкою 75-85%) і кінцевий вміст сірки до 0,004%.

У випадку обробки сталі на УДМ порошкоподібним вапном та сумішами на його основі, інжектуємих струмом аргону, ступінь наближення системи шлак-метал до рівноваги досягає 21-24%, що дозволяє при широкому освоєнні даної технології відмовитись від застосування дорогого синтетичного шлаку.

5. Розроблено теоретичні основи та впроваджено комплексну технологію одержання низьколегованих сталей особливо високої якості. На прикладі низьколегованої сталі масового призначення типу 09Г2С, широко використовуваної як конструкційний матеріал, показано, що для досягнення унікально високих показників ударної в'язкості (до 280 Дж/см² при температурі випробування 60°C нижче нуля на зразках з гострим надрізом) при підвищеній статичній міцності необхідне поєднання високої чистоти сталі, особливо по сірці і неметалевим включенням, з оптимальною термодформаційною обробкою прокату, що забезпечує дрібне зерно розміром 9-10 мкм. Оптимальним режимом для сталі 09Г2С і багатьох інших низьколегованих сталей є контрольована прокатка з прискореним охолодженням. При виконанні цих умов забезпечується різке підвищення практично всіх експлуатаційних характеристик товстолистового прокату: ізотропності, втомної міцності, корозійної та сірководневої стійкості, зварюваності та ін.

6. Розроблено та впроваджено комплекс технологій, що забезпечує: підвищення виходу придатного та зниження угару заліза у шлак шляхом застосування фурм нової конструкції; зниження витрати алюмінію в 1,5-2,0 рази при розкисленні сталі гранульованим або фракціонованим алюмінієм при випуску плавки із конвертера; зниження угару марганцю і кремнію при розкисленні та легуванні і вмісту сірки на 0,002-0,005% при позапічній десульфурації сталі у ковші за рахунок використання рідких лігатур замість твердих феросплавів; зниження вмісту сірки у сталі, витрат ковшових вогнетривів,

марганцевистих сплавів та алюмінію за рахунок переходу на основну футеровку сталерозливних ковшів; зниження вмісту водню у сталі і його впливу на дефекти осьової зони безперервнолитих заготовок; поліпшення макроструктури осьової зони слябів за рахунок оптимальної схеми модифікування і мікролегування різних марок сталі при обробці порошкоподібними реагентами (силікокальцій, РЗМ, силікомагній, силікоцирконій, феробор), інжектуєними у струмі аргону при обробці на УДМ.

7. В наслідок впровадження в конвертерних цехах з великовантажними агрегатами комплексу нових технологій і технічних рішень економічний ефект від зниження собівартості металопродукції становив більше 17,865 млн. крб. в рік (у цінах 1990 р.) при частковому ефекті автора 1,7 млн. крб.

Основний зміст роботи опубліковано в роботах:

1. Поживанов М.А. Опыт производства низкосернистых трубных сталей. // Металлург. и горнорудная пром-сть - 1992. - N 3. - С.12-16.

2. O.V.Nosocenکو, S.G.Melnik, M.A.Pozivanov. Priprava konvertorove oceli k plynulemu odlevani. // X Mezinarodni Hutnika konference, Trinec, Rigen. - 1989. - S.135-141.

3. М.А.Поживанов, В.И.Баптизманский, О.В.Носоченко и др. Закономерности и опыт десульфурации чугуна гранулированным магнием. // Сталь. - 1993. - N 8 - С.25-28.

4. Поживанов М.А., Шевченко А.Ф., Двоскин Б.В. Анализ эффективности внепечной обработки чугуна гранулированным магнием. // Металлург. и горнорудная пром-сть - 1993. - N 10. - С.13-18.

5. Гулыга Д.В., Поживанов М.А., Семенченко П.М. и др. Технологические преимущества десульфурации чугуна гранулированным магнием в заливочных ковшах сталеплавильных цехов. // Металлург. и горнорудная пром-сть - 1991. - N 3. - С.18-19.

6. Шевченко А.Ф., Гулыга Д.В., Поживанов М.А. и др. Опыт-но-промышленное опробование производства чугуна с супернизким содержанием серы для выплавки в конвертерах чистой по сере стали. // Металлург. и горнорудная пром-сть. - 1991-N 3. - С.7-9.

7. Поживанов М.А., Окороков Б.Н. и др. Продувка

конвертерной ванны кислородом с циклическим изменением расхода кислорода.// Сталь.-1984.- N 7.- С.19-20.

8.Поживанов М.А.,Окороков Б.Н. и др. Динамические характеристики процесса окисления углерода в конвертерной ванне.//Изв.ВУЗов Черная металлургия.-1984.-N 5.-С.19-20.

9.Поживанов М.А., Зимин Ю.В., Окороков Б.Н. Переходная функция скорости окисления углерода в конвертере.//Изв.ВУЗов Черная металлургия.-1982.- N 11.- С.149.

10.Маринин А.В.,Михневич Ю.Ф.,Поживанов М.А. и др. Технологические особенности и проблемы выплавки в конвертерах безванадиевой стали для магистральных газопроводов.//Качество толстолистового проката (штрипса) из новых низколегированных сталей и труб для магистральных газопроводов. Тез. докл. Всесоюз. совещание. - .1989.-С.1-2.

11.Поживанов М.А.,Носоченко О.В.,Ганошенко В.И. и др. Выплавка в конвертерах чистого по примесям металла.// Бюл. НТИ Черная металлургия.-1991.-N3.- С.58-59.

12.Конопля В.Г., Плохих П.А.,Поживанов М.А. и др. К вопросу о дефосфорации при выплавке рядовых и качественных сталей в 350-400-т конвертерах.//Тр. 5-й Всесоюз.конф. "Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов".-Мариуполь.-1991.-ч.2.- С.34-35.

13.Пошинов О.А.,Казаков С.В.,Свяжин А.Г.,Поживанов М.А. Модель рафинирования металла в ковше от серы активными шлаковыми смесями.// Тр.5-й Всесоюз. конф. "Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов"-Мариуполь.-,1991, ч.2.-С.36-38.

14.Поживанов М.А., Семенченко П.М. и др. Десульфурация стали в ковше активными шлаковыми смесями.//Металлург. и горнорудная пром-сть.-1991.- N 4.-С.35-38.

15.Пошинов О.А.,Казаков С.В.,Поживанов М.А. и др. Степень использования рафинирующих свойств шлаков при внепечной обработке стали.// Тр.10-й Всесоюз.конф. по физико-химическим основам металлургических процессов.- Москва.-1991.-С.27.

16.Баптизманский В.И.,Черевко В.П.,Вихлевщук В.А.,Поживанов М.А. и др. Десульфурация стали в ковше с

использованием порошкообразной извести. // Тр.1-го конгресса сталеплавателей.-Москва.-1992.-С.207-209.

17.Черевко В.П., Лонский А.М., Поживанов М.А. и др. Исследование десульфуризирующей способности порошкообразных шлакообразующих смесей на основе мелкокристаллической извести при внепечной обработке стали. // Тр.5-й Всесоюз. конф. "Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов". - Мариуполь.-ч.2.-1991.- С.32-33.

18.Баптизманский В.И.,Черевко В.П.,Поживанов М.А.и др. Десульфурация стали в ковше с использованием порошкообразной извести. //Сталь.- 1992.- N 11.- С.28-31.

19.Баптизманский В.И., Черевко В.П., Лонский А.М.,Красюков С.П.,Поживанов М.А.,Иванов Е.А. Внепечная десульфурация стали мелкокристаллической известью и смесями на ее основе. // Металлург. и горнорудная пром-сть.-1993.-N 1.- С.11-13.

20.Поживанов А.М.,Поживанов М.А.,Иванов Е.А. и др. Повышение полноты дожигания окиси углерода в 350-т конвертерах.//Металлург. и горнорудная пром-сть.-1990.- N 4.-С.18-20.

21.Вяткин Ю.Ф., Вихлевщук В.А., Поляков В.Ф., Поживанов М.А. и др. Ресурсосберегающая технология раскисления стали алюминием в ковше.// Черная металлургия. Бюллетень.-1990.-Вып.6. -С.53-55.

22.Поживанов М.А., Носоченко О.В.,Мельник С.Г. и др. Освоение выплавки легированной стали в 350-т конвертерах с использованием жидких лигатур и внепечной рафинирующей обработки.//Металлург.и горнорудная пром-сть.-1991.-N 4.-С.33-35.

23.Нагорный А.П., Сахно В.А., Поживанов М.А., Кравченко А.И. Повышение стойкости сталеразливочных ковшей, футерованных периклазоизвестковыми термообработанными огнеупорами. // Сталь. -1991.-N 8.- С.31-33.

24.Стороженко А.С.,Поляков В.Ф.,Сахно В.А.,Поживанов В.А. и др. Эффективность использования сталеразливочных ковшей с основной футеровкой. //Сталь.-1991.- N 8.- С.27-30.

25.Вихлевщук В.А.,Сахно В.А.,Черногрицкий В.М.,

Поживанов М.А. и др. Производство стали с узкими пределами химического состава для проката повышенной прочности. // "Черметинформация", Бюл., 1992, вып.2, с.29-30.

26. Рыбалов Г.В., Жигач С.И., Поживанов М.А. и др. Высокоскоростная продувка металла аргонem при внепечной обработке стали. // Сталь.-1991.- N 9.- С.24-26.

27. Поживанов М.А., Казаков С.В., Свяжин А.Г., Пошинов О.А., Мельник С.Г. Определение оптимальной продолжительности продувки расплава инертным газом. // Сталь.-1991.- N 9.- С.21-23.

28. Сахно В.А., Поживанов М.А., Тихонюк Л.С. и др. Влияние химического состава и газонасыщенности непрерывнолитых слябов на качество осевой зоны штрипса для газопроводных труб большого диаметра. // Металлург. и горнорудная пром-сть., 1991. - N 3.- С.15-17.

29. Куклев В.Г., Оберемченко Н.С., Носоченко О.В., Поживанов М.А. Разработка и промышленное опробование технологии внепечной обработки трубной стали магнием. // Внепечная обработка металлов: Тез. докл. Всесоюз. конф.-Киев.-1991.-С.4-5.

30. Поживанов М.А., Татарников В.П., Левин Д.Ю., Бузун И.Л. Опробование технологии микролегирования титансодержащих трубных сталей цирконием. // Внепечная обработка металлов: Тез. докл. Всесоюз. конф.-Киев.-1991.-С.11-12.

31. Троцан А.И., Николаев Г.А., Ленский В.Г., Поживанов М.А., Юшко И.Г. Способ рафинирования и микролегирования трубной стали при непрерывной разливке. // Внепечная обработка металлов: Тез. докл. Всесоюз. конф.-Киев.-1991.-С.9-10.

32. Носоченко О.В., Николаев Г.А., Ленский В.Г., Поживанов М.А., Юшко И.Г. Совешенствование технологии непрерывной разливки стали в крупногабаритные слябы для дальнейшей прокатки на толстый лист и плиту. // X Mezinarodni Hutnika konference, Tri-nec, Rigen.-1989.-S.360-366.

33. Коновалов Ю.В., Буянда А.А., Поживанов М.А. и др. Исследование качества металла при горячем посaде непрерывнолитых слябов в нагревательные печи стана "3600". // Сталь.- 1991.-N 5.- С.55-56.

34.Новик В.И., Носоченко О.В., Емельянов В.В. и др. Получение толстых листов с повышенной сплошностью. // Сталь.-1991.- N 5. - С.63-66.

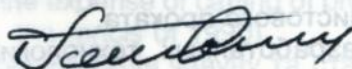
35.Харчевников В.П., Шемякин А.В., Носоченко О.В., Поживанов М.А. и др. Особенности производства толстых листов с повышенной сплошностью и пластичностью на МК "Азовсталь".//Тр. 11-й Всесоюз.конф. по проблемам слитка.- Волгоград.- 1990.-С.70-72.

36.Емельянов В.В., Носоченко О.В., Поживанов М.А. и др. Влияние микролегирования бором и титаном на сплошность и механические свойства стали 09Г2С.//Внепечная обработка металлов: Тез. докл. Всесоюз. конф.-Киев.-1991.- С.70-72

37.Морозов Ю.Д., Поживанов М.А., Чевская О.Н., Носоченко О.В. Комплексная технология повышения хладостойкости низколегированной стали массового назначения.// Сталь.-1994.- N 11.-С.24-27.

38.Поживанов М.А., Носоченко О.В., Шульте А.Ю., Левин Д.Ю. Исследование влияния степени рафинирования стали на механические и служебные свойства толстолистового проката.//Тр. 1-го конгресса сталеплавателей.-Москва.- 1993.-С.250-254.

По теме диссертации получены: патент Российской Федерации N2010884, авторские свидетельства: NN 1101452, 1157074, 1175969, 1280023, 1439129, 1548215, 1592345, 1611562, 1643617, 1657540, 1660839, 1675343, 18112736, 1823274 и положительные решения по заявкам 4292850 / 25-05 (127704) , 4440491 / 31 - 02/093140, 4452049/27-02/101618,4480985/02/117404,4650555/02(004725), 4650556/43-02/004727, 4651500/27-02 (025303),4667067 / 27-02 (042020), 4686433/31-02/063126), 4737801 / 27-02(0965547), 466067/27-02(042020), 4842998/02(070142), 4906527/02/009936, 4906660/02/010291.



АННОТАЦИЯ

Поживанов М.А. Разработка теоретических основ и комплексной технологии получения особо чистой высококачественной конвертерной стали для толстого листа.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук в форме научного доклада по специальности 05.16.02 - металлургия черных металлов, Государственная металлургическая Академия, Днепропетровск, 1994г.

Защищается 38 научных работ и 29 авторских свидетельств, которые содержат теоретические исследования процессов глубокой десульфурации чугуна и стали, а также результаты экспериментальных и промышленных исследований по разработке комплексной технологии производства особо чистых конвертерных сталей для толстого листа.

Установлены основные термодинамические и кинетические закономерности десульфурации чугуна гранулированным магнием. Определены на основе современной теории массообмена лимитирующие звенья процессов усвоения магния чугуном и его взаимодействия с серой.

Исследованы термодинамические и кинетические особенности десульфурации стали жидкими синтетическими шлаками и кусковыми твердыми шлакообразующими смесями (ТШС) в большегрузных 350-т сталеразливочных ковшах.

Разработана и внедрена комплексная технология десульфурации чугуна и стали, обеспечившая организацию массового производства сталей с содержанием серы не более 0,004%.

Отработаны оптимальные режимы термодиформационной обработки низколегированных сталей, которые в сочетании с высокой степенью рафинирования обеспечивают уникальный комплекс механических и служебных свойств толстолистового проката.

Внедрение разработанных технологий в конвертерном и толстолистовом цехах комбината "Азовсталь" обеспечило экономию материалов и металла с общим экономическим эффектом в сумме 17,865 млн. руб.(в ценах 1990 г.)

ANNOTATION

Pozhivanov M.A. Working Out of Teoretical Fundamentals and Complex Technology of Obtaining Particularly Pure High-quality Converter Steel for Thick-gage Plate.

The thesis for the degree of a doctor of technical science in the form of a scientific report. Speciality 05.16.02 Metallurgy of Ferrous Metals. State Metallurgical Academy Dnepropetrovsk, 1994.

38 scientific papers and 29 author's certificates devoted to the teoretical research of the processes of deep cast-iron and steel desulfurization are defended. These papers contain the results of experimental and industrial research on working out of complex technology of production of particularly pure converter steels for thick-gage plate.

The basic thermodynamic and kinetic characteristics of the process of cast-iron desulfurization by granulated magnezium are determined. The limiting elements of the processes of magnezium assimilation by cast iron and its interaction with sulphur are defined on the basic of the modern theory of mass exchange.

The principal thermodynamic and kinetic peculiarities of steel desulfurization by free-running synthetic slags and solid slag-generating mixtures (SSM) when pouring it into heavy steel pouring ladle 350 tons.

The optimum conditions of thermoderformational processing of low alloyed steel were defined. It provides for the unique complex of mechanical and functional properties of thick-gage plate rolled metall.

The technical solution suggested on the basic of the teoretical and experimental investigations ensured the conditions for working out and application in industry the new grade of steel for special purposes, for expanding the spere of application of steels of mass purposes with new complex of mechanical and functional properties. The methode mentioned above helped to increase the high quality steel production.

As a result of industrial intrudaction of the investigation result the economic effect at the expense of catting of production costs of 17,865 mln roubles (in the pricis of 1990).

Ключові слова: десульфурація чавуну та сталі, магній, шлак, модифікування, товстий лист.

Автор Поживанов Михайло Олександрович.
Розробка теоретичних основ та комплексної технології
одержання особливо чистої високоякісної
конвертерної сталі для товстого листа.
Підписано до друку 18.10.94. Формат 60/84 1/16.
Папір друкарський, офсетний друк. Умовн. друк. арк.
2,1. Підприємство "Редакція газети "Приазовський
рабочий", заказ № 98.
Тираж 50 прим.
Адреса: 341000, м. Маріуполь, пр. Леніна, 19.

455912

AB 31.324