

УДК:669.1

<https://doi.org/10.34185/tpm.5.2021.03>

Величко О.Г., Безшкурченко О.Г., Стовпченко Г.П., Іващенко В.П., М'яновська Я.В.,
Чеченєв В.А., Броцький О.В.,

Проблемні питання одержання високовуглецевої електросталі
*Velichko O.G., Bezshkurenko O.G., Stovpchenko G.P., Ivashchenko V.P., Myanovska Y.V.,
Chechenev V.A., Brotsky O.V.*

Problematic issues of high-carbon electrical steel production

В даний час на світовому ринку затребувана катанка для виробництва дроту з низько-, середньо- і високовуглецевих нелегованих і легованих сталей під пружини, канати, металокард, зварювальні електроди і обміднений дріт для зварювання будівельних конструкцій, корпусів судів, труб великого діаметра і магістральних газонафтопроводів, для виготовлення якої не потрібне проведення зм'якшуючого відпалу перед волочінням катанки або на проміжному розмірі дроту. Найбільш відповідальними видами катанки з високовуглецевої сталі є катанка, призначена для виробництва металокарду і високоміцних арматурних канатів. Вищевказана продукція повинна мати високі споживчі властивості, рівень яких багато в чому залежить від формування структурного стану металу, в тому числі і в процесі прискореного охолодження з прокатного нагріву.

В даний час обсяг виробництва катанки в світі перевищує 50 млн. т, що пояснюється широким сортаментом виробленої з неї готової продукції – канати, металокард, пружини, голки, струни, сітки, кріплення, зварювальні електроди та інші металовироби. За стандартом ГОСТ 2590-2006 до катанки відносять круглі профілі діаметром 9,0 мм і менше, круглі профілі діаметром 10,0 мм і більше відносять до дрібносортового прокату. У зарубіжній і вітчизняній літературі іноді катанкою вважають круглий прокат з вуглецевих, низько- і високолегованих сталей, вироблений на безперервних дровових станах і дров'яних лініях мілкосортно- і сортодротових станів, незалежно від діаметра, що досягає 26 мм. Основна частка катанки направляється для подальшої переробки на сталедротові і метизні підприємства.

В останні роки збільшилися обсяги виробництва катанки з безперервнолитих заготовок з високим ступенем металургійної чистоти, в тому числі для виготовлення особливо відповідальних виробів. Наприклад, таких, як металокард, який має високий рівень витривалості, а по міцності цей вид продукції поділяють за нормативною міцністю на нормальну (НТ 2400 ... 2750 Н / мм²), високу (НТ 2750 ... 3100 Н / мм²), надвисоку (СТ 3100 ... 3450 Н / мм²) і ультрависокоміцну (УТ 3450 ... 3750 Н / мм²).

Значна увага приділяється удосконаленню процесу виплавки високовуглецевої сталі. Пропонують різні способи для забезпечення чистоти сталі та формування високих міцносних властивостей. Для поліпшення пластичності сталей широко використовують легуючі добавки, що мають значний вміст вуглецю і марганцю та обмежений вміст азоту. Проаналізовано обробку на установці ківш-піч в процесі виплавки високовуглецевої сталі з поліпшеною пластичністю для холодного деформування.

Аналіз публікацій за темою дослідження.

Електричні печі мають істотні переваги в порівнянні з іншими сталеплавильними агрегатами і тому є основними агрегатами для виробництва високолегованих, нержавіючих, жаростійких, жароміцних і якісних конструкційних сталей [1-8]. Аналіз основних параметрів найбільш сучасних ДСП по приведених авторами [9, 10] даних, показує, що продуктивність їх росте удвічі швидше, ніж маса плавки і потужність трансформаторів, що свідчить про інтенсивний шлях вдосконалення агрегатів і технологій виплавки. Збільшення інтенсивності і гнучкості процесу плавки і зниження вартості сталі є найважливішими завданнями сучасної електрометалургії сталі. На вирішення їх спрямовані і конструктивні удосконалення устаткування і розробка нових технологій виплавки сталі [11]. До найбільш ефективних конструкторських рішень, що дозволили на сьогодні зробити значний крок уперед у підвищенні ефективності плавки, є печі із зануреною дугою, системи підігрівання скрапу, пристрої вдування кисню і палива (ПВП, природний газ), системи перемішування ванни (продування газами або електромагнітні) [12].

Величко Олександр Григорович – д.т.н., проф. УДУНТ,
Безшкурченко Олексій Георгійович – к.т.н., УДУНТ,
Стовпченко Ганна Петрівна – д.т.н., проф.
Іващенко Валерій Петрович – д.т.н., проф. УДУНТ
М'яновська Яна Валеріївна – д.т.н., доц. УДУНТ,
Чеченєв Володимир Андрійович – д.т.н., проф. УДУНТ,
Броцький Олександр Володимирович – аспірант УДУНТ

У сучасних ДСП, які працюють з вдуванням значної кількості кисню, в технологічному ланцюжку з агрегатами ківш-піч і вакууматором виплавляють практично увесь сортамент сталей, які виплавлялись раніше тільки в кисневих конвертерах, у тому числі і з низьким вмістом вуглецю [13]. Кисень в ДСП використовують для контрольованого зневууглецювання розплаву, допалювання СО до СО₂ в робочому просторі печі, нагріву і розрізання металошихти, поліпшення спінування шлаку за рахунок генерування бульбашок СО з використанням різних дуттьових пристроїв.

Хімічні форсунки, які використовуються для інтенсифікації роботи ДСП, залежно від виконуваних ними функцій можуть бути [14]: пальники; ультразвукові кисневі фурми; форсунки для м'якого вдування кисню; вуглецеві форсунки; фурми для вдування вуглецю під ванну або під шлак; форсунки для вдування вапна. У роботі авторів [14] наводяться дані про те, що при надзвуковому вдуванні кисню з використанням різних пристроїв, у тому числі багатофункціональних, основна його частина реагує з поверхнею розплаву і розчиняється в

Oleksandr Velychko – d.t.s., prof. USUST
Oleksiy Bezshkurenko – c.t.s., USUST,
Stovchenko Hanna – d.t.s. prof.
Ivashchenko Valery – d.t.s., prof. USUST
Myanovska Yana – d.t.s. USUST,
Chechenev Volodymyr – d.t.s., Prof. USUST,
Oleksandr Brotskyi - is a graduate student at USUST

ньому.

На початку періоду рафінування, коли вміст вуглецю в розплаві досить великий, близько 90% кисню, що вдувається йде на зневуглецювання. Під час останньої стадії окислювального рафінування починається переважне окислення заліза. Якщо потрібно одержати особливо низький вміст вуглецю (0,02-0,03%) близько 90% кисню витратиться на утворення FeO. У кінці сталеплавильного циклу, якщо інтенсивне окислення заліза не буде збалансовано із спінюванням шлаку, істотно знизиться вихід придатного і зросте ерозія вогнетривів, зважаючи на високу температуру і вміст FeO в шлаку.

Ці основні положення покладені в основу практики управління пристроями вдування (які приведені на прикладі PureJet [14]): для запобігання локального переокислення шлаку вдування кисню супроводжується одночасним вдуванням вуглецю, особливо для розплавів з кінцевим вмістом вуглецю менше 0,1%; активне вдування кисню починається, коли кінетично можливі обидві стадії його видалення (для запобігання переокислення шлаку). Ступінь використання кисню і консистенція шлаку, що вспінується, покращуються при використанні дуттьових пристроїв в різних точках печі, що також може бути використано для зменшення тепловтрат і сприяє зменшенню вмісту азоту в сталі. Крім того, якщо дуттьові пристрої розташовані в декількох різних місцях, може бути прискорено зневуглецювання і гомогенізація температури і хімічного складу ванни.

Ефективність передачі теплоти паливно-кисневих пальників при вдуванні факела в об'єм вспіненого шлаку зростає з 40 до 70% в порівнянні з вдуванням при плоскій ванні. Тобто робота пальників стає ефективною не лише в період плавлення, але і впродовж усієї плавки, що сприяє підвищенню продуктивності печі і зниженню питомої витрати електроенергії.

Являє інтерес пристрій для вдування газу CoJet® (запатентований компанією Praxair Technology, Inc.), який вживається для вдування кисню у вигляді когерентного струменя [15]. Автоматизований пристрій складається з декількох інжекторів CoJet® (зазвичай від одного до чотирьох), що кріпляться до стінок печі. Інтенсивність продування від 1000 до 3200 Нм³/год. на кожен інжектор, що дозволяє працювати на шихті, що складається з 100% лому або заліза прямого відновлення. Первинний діаметр струменя і швидкість зберігаються упродовж великого відрізка, подаючи при цьому в сталеву ванну точну кількість кисню з максимальною площею взаємодії і мінімальним розбризкуванням.

Розробники вказують на дві характерні особливості системи CoJet® - здатність виконувати функції фурми багатоточкового введення і більш глибоке проникнення дуття в глибину ванни, що забезпечує умови для кращого продування ванни і її перемішування, і, в результаті, дає нижчий вміст

FeO в шлаку і збільшення виходу готової продукції. Другою перевагою таких пристроїв є зниження вмісту азоту.

Високі результати показують і інші види пристроїв для одночасного вдування кисню і палива. Так, розроблений фірмою BOC (Шеффилд, Великобританія) пальник Burnjector генерує надзвуковий струмінь кисню з коаксіальним вдуванням вуглецю, утворюючи надзвукове полум'я, яке зберігає свої властивості на дистанції трьох метрів [16].

Оскільки нагрів в дуговій печі проводиться згорі, у ванні існує лише незначна природна конвекція. Рух металу, що викликається електродинамічною дією дуг, і продування киснем покращують ситуацію, але зазвичай цього недостатньо для усунення нерівномірності складу металу і температури. При продуванні низу (по периферії) ванна гомогенізується; внаслідок кращого контакту на межі шлак-метал зростає швидкість хімічних реакцій.

В результаті застосування різних способів інтенсифікації в сучасних електросталеплавильних цехах питомі витрати альтернативних енергоносіїв істотно зросли: витрата природного газу складає 8...10 м³/т сталі; коксу або вугілля (кусового і порошкоподібного) 2...14 кг/т; газоподібного кисню 30...45 м³/т. У зв'язку з цим, на високопотужних 100-т печах тривалість плавки скоротилася до 40...60 хвилин; при цьому питома витрата електроенергії складає 320...420 кВт·год./т, електродів 1,4...2,6 кг/т [17]. Краща світова практика експлуатації електропечей демонструє витрату електроенергії менше 300 кВт·год./т і період між випусками менше 60 хвилин [16].

В огляді [17] автори вказують, що використання різних альтернативних видів енергії в сучасній надпотужній дуговій печі нерівноцінне з урахуванням величини експлуатаційних витрат і впливу на собівартість металу, що виплавляється. Економічна ефективність застосування конкретного виду альтернативної енергії при виплавці сталі в дуговій печі в значній мірі визначається вартістю одного кВт·год теплової енергії, засвоєної продуктами плавки (металом і шлаком) з урахуванням цін на конкретні енергоносії. При підвищенні температури брукху і наближенні до температури його плавлення, що швидко досягається в порівняно невеликих об'ємах шихти, прилеглих до стаціонарних пальників, недопал палива різко зростає. Тому автори [17] вказують, що стаціонарні стінові пальники можуть ефективно працювати не більше 15 хвилин від початку плавлення, а підвищення їх одиничної потужності ще більш скорочує тривалість роботи пальників.

Одним з можливих рішень є установка великого числа малопотужних пальників і їх розосередження по периметру і висоті печі. Наприклад, на 90-т дуговій печі Danarc встановлені 12 пальників: нижній рівень - 8 пальників потужністю по 3,5 МВт, верхній рівень - 4 пальника потужністю

по 3,5 МВт. Загальна потужність пальників становить 42 МВт, майже половину потужності двох використовуваних трансформаторів (2 x 43,5 МВ · А) [18].

Інше рішення - використання потужних поворотних пальників із змінним напрямом факела. При роботі такого пальника факел переміщується від уже нагрітих мас брухту до відносно холодних. В результаті зона дії факела збільшується в кілька разів і, відповідно, зростає корисна потужність пальника. При роботі з пальниками тривалість плавлення скоротилася на 25%, витрата електроенергії - на 17% [19], однак, склепінні пристрої виявилися складними в експлуатації. Варіантом використання ідеї змінення напрямку факела є заявлене тими ж авторами більш ефективне технічне рішення [20] по установці високопотужного поворотного пальника в еркері печі. У розвиток ідей використання тепла газокисневих пальників в робочому просторі печі автори сформулювали концепцію двох стадійного процесу плавки сталі в так званій паливно-дуговій печі (FAF), в якій частка тепла за рахунок електроенергії складе 14%, при питомій витраті природного газу і кисню на рівні показників в ДСП [7,8].

Застосування нових видів шихти та комбінованих процесів

Сьогодні істотно змінюється і структура металошихти в електродугових печах. Підвищенню ефективності виплавки сталі в електропечах, а також зниженню вмісту в ній кольорових металів сприяє використання первородних матеріалів - заліза прямого відновлення (DRI або HBI); використання рідкого чавуну з доменної печі або вагранки; або поєднання цих матеріалів. Використання гарячого заліза прямого відновлення і рідкого чавуну дозволяє додатково внести тепло в процес плавки і скоротити час виплавки і витрату електроенергії.

Відносно новим і досить ефективним процесом є процес Conarc, розроблений фірмою SMS Demag. Завдяки цьому процесу можна домогтися високої чіткості у використанні сировини, завантажуючи максимально 80% чавуну або (як альтернатива) 100% металобрухту, або 100% DRI. У цьому процесі можна використовувати широкий діапазон матеріалів з різним вмістом заліза: чавун, металобрухт, частково відновлені DRI, HBI з різними залізовмісними складовими. Процес Conarc вимагає наявності в пічному просторі склепінної кисневої фурми і додаткових вставок у поду для донної продувки, що забезпечують умови для проведення технологічного процесу (схожого з конвертерним) в агрегаті. Продування киснем через склепінну фурму організовує вертикальний потік кисню, спрямований в ванну, який має великий імпульс і ефективний вплив в порівнянні зі звичайними методами, коли кисень подається збоку. Процес Conarc дозволяє значно знизити перехід заліза в шлак. Рафінування в

агрегаті Conarc дозволяє домогтися мінімального вмісту азоту в металі [21]. Метод Conarc дозволяє вирішити проблему матеріалу, що завантажуються, для металургійних міні-заводів з відносно негнучкою електродуговою піччю, яка використовується як центральний плавильний агрегат, включивши в процес відповідний агрегат першого переплаву [21]. Підвищений вміст рідких шихтових матеріалів дозволяє знизити витрату електроенергії до 143...260 кВт.год/т [21].

Однією з найбільш ефективних систем підігріву скрапу є система Consteel, в якій здійснюється безперервне завантаження скрапу в ДСП з попереднім його підігрівом на транспортерах гарячими газами, що виходять з печі [22]. Окис вуглецю, що міститься в газах, окислюється за допомогою повітря, що вдувається, подача якого регулюється автоматично. Цим забезпечується краща утилізація енергії. Під час операції безперервної подачі скрапу сталь в ванні ДСП постійно підтримується в розплавленому стані, а скрап, що надходить в піч, розплавляється при зануренні у ванну. Електрична дуга взаємодіє з рідким металом, а не з твердим скрапом. В таких умовах дуга зберігає стабільність, і на неї не впливає наявність твердої шихти у ванні, як при завантаженні скрапу порціями (з попереднім підігрівом або без нього).

Комбінуючі найдосконаліші технології електросталеплавильного виробництва VAI Voestalpine вдалося створити електродугову піч ULTIMATE EAF, що забезпечує виплавку близько 1,8 млн. т рідкої сталі на рік при масі плавки 120 т і тривалості плавки від випуску до випуску всього 30 хв [23].

В результаті впровадження прогресивних нововведень істотно змінилися і самі електродугові печі і технології плавки в них, що дозволяє говорити про появу нових електросталеплавильних процесів. В англійській літературі з'явилися спеціальні терміни для їх позначення [24]: EAOF (electric arc oxygen furnace) і EOF (electric oxygen furnace) - електродугова киснева піч; New OSM - традиційний або безперервний переplав з попереднім підігрівом скрапу; Advanced melter - прогресивна плавильна піч - агрегат з використанням природного газу або в поєднанні з підігрівом скрапу.

Однією з тенденцій сучасного сталеваріння є зближення можливостей основних сталеплавильних агрегатів чорної металургії - кисневих конвертерів і дугових сталеплавильних печей, як з точки зору ведення кисневого рафінування, так і структури металошихти. Використання кисню і різних альтернативних джерел тепла для інтенсифікації процесу плавки сталі в сучасній дуговій печі дозволяє істотно підвищити її продуктивність, шихтову гнучкість процесу, а також забезпечити гомогенний хімічний склад металу і знижений вміст в ньому азоту.

Азот в сталі і проблеми зниження його вмісту в металі ДСП

Відмінною особливістю виплавленої в ДСП сталі, в порівнянні з конвертерної сталлю, зазвичай є більш високий вміст азоту – 40...110 ppm проти 10...40 ppm. Азот адсорбується рідким залізом двома шляхами [25]. Перший - дисоціація двоатомного газу. Чим більше парціальний тиск азоту в атмосфері на межі розділу повітря-сталь, тим більше його адсорбція рідкої сталлю. Таким шляхом азот потрапляє переважно при розвиненій поверхні контакту повітря і сталі - наприклад, при вдуванні вуглецьвмісних матеріалів повітрям. Другий шлях поглинання азоту - з моноатомного стану. Молекулярний азот дисоціює в форму моноатомного газу при високих температурах в плазмі дуги ДСП. Збільшення вмісту азоту за рахунок цього джерела більш істотно, ніж з першого.

Ще одне джерело попадання азоту в метал - шихтові матеріали, що завантажуються в піч. У таблиці 1 наведено вміст азоту в різних використовуваних в ДСП шихтових матеріалах за даними авторів [26].

Значна кількість азоту вноситься зі скрапом, коксом і дуттям, а також флюсовими матеріалами. З точки зору зменшення внесення азоту максимальна перевага забезпечується при використанні в металозавалці заліза прямого відновлення. Використовують кілька основних стратегій (рисунок 1) для зниження вмісту азоту в металі ДСП: вспінювання шлаку, кипіння ванни за рахунок бульбашок СО при зневуглецюванні, обмеження попадання азоту з матеріалами (в тому числі використання першокласного брухту і первородних шихтових матеріалів - чавуну, заліза прямого відновлення).

Таблиця 1 - Вміст азоту в різних матеріалах, які використовуються в сталеплавильному виробництві [26]

Шихтовий матеріал	Вміст азоту
Скрап (металобрухт)	30-120 ppm
Залізо прямого відновлення або ГБЖ	20-30 ppm
Рідкий чавун з ДП	60 ppm
Холодний чавун	20-30 ppm
Гаряча шихта	10 ppm
Кокс	5000-10000 ppm
Кисень	30-200 ppm
Повітря для вдування вуглецю	78%
Газ для донного перемішування (N ₂)	99,9%
Газ для донного перемішування (Ar)	30 ppm
Вапняк	400 ppm



Рисунок 1 - Основні можливості зниження вмісту азоту в сталі [26].

У дослідженні, виконаному авторами [27], показано зміну вмісту азоту в сталі під час плавлення і рафінування в ДСП. Суцільна лінія (Рисунок 2) яв-

ляє плавки з використанням 50% оборотного брухту і 50% брухту (скрапу), пунктирна - 100% скрапу.

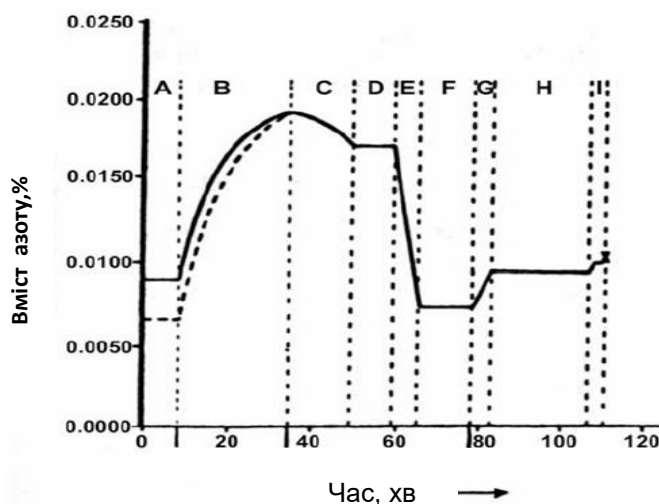


Рисунок 2 – Зміна вмісту азоту під час плавлення металу в ДСП.

Різні стадії сталеплавильного процесу позначені буквами латинського алфавіту і позначають: А: Занурення електродів в холодну шихту; В: Формування найбільших порцій рідкого металу і їх зростання; С: Плавлення залишилися металошихти; D: Нагрівання ванни до вуглецевого кипіння; E: Період вуглецевого кипіння; F: Присадка феросплавів і доведення ванни до температури випуску; G: Випуск плавки; H: Рідка сталь в сталерозливних ковші; I: Рідка сталь в промковші і розливання. Періоди, коли вміст азоту зменшується - стадії С і E. Під час стадії С формується шлак, що запобігає адсорбції азоту, а розплавляються залишки металошихти розбавляють розплав, знижуючі вміст азоту. На стадії E бульбашки CO, які генеруються в сталі, розчиняють азот і видаляють його в атмосферу. Можна відзначити, що стадія F - добавка феросплавів в ДСП не типова для практики сучасної електromеталургії. Однак, згідно з рисунком ця стадія не впливає на вміст азоту, що дозволяє розглядати дані для інших періодів. Таким чином, вміст азоту в сталі залежить від вмісту в ній вуглецю і кисню і інтенсивності протікання реакції зневуглецювання.

На вміст азоту в сталі прямо впливає вспінювання шлаку. Гарне спінення призводить до зниження його концентрації на 10-20 ppm до рівня близько 30 ppm при "промиванні" ванни в процесі більш інтенсивного зневуглецювання і в результаті кращого захисту металу від атмосфери печі шаром спіненого шлаку. Спінений шлак є грубодисперсною системою (розмір бульбашок газу від 10 - 4 см і більше), він седиментаційно нестійкий [19].

Утворення і стійкість спіненого шлаку залежать від фізико-хімічних властивостей шлаку (в'язкість, поверхневий натяг, температура) і від інтенсивності і місця газовиділення і розподілу газових бульбашок за розмірами. Всі ці параметри зазвичай переводяться в так званий індекс спінювання. Досвід роботи дугових печей з спініними шлаками показує, що формування добре спіненого шлаку

забезпечується при основності шлаку $B = (CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3)$, що дорівнює 1,8-2,3, температурі ванни 1550 - 1580°C, вміст в шлаку близько 20-24% FeO і 8-12% MgO, вміст у ванні 0,10-0,3% C. Індекс спінювання підвищується зі збільшенням вмісту CaF_2 в шлаку більше 5% і зменшується з підвищенням концентрації MnO; він залежить також від вмісту P_2O_5 (максимальне значення при 3% P_2O_5). Зміна індексу спінювання у всіх цих випадках пов'язана зі зміною в'язкості шлаку. Вспінювання шлаку і стійкість піни найкраще забезпечуються інтенсифікацією введення кисню в піч при підвищенні його витрати до 50 м³/т і вдуванням вугільного порошку при питомій витраті до 10 кг/т.

Останнім часом опубліковані роботи авторів [28], в яких відображені загальні закономірності процесів розчинення азоту розплавами Fe-C і деякі особливості, встановлені експериментально. Автори підкреслюють, що теоретично для деазотації металу необхідна вільна від поверхнево-активних елементів, таких як кисень і сірка, поверхня розділу газ-метал. Швидкість адсорбції, а також і можливість видалення азоту зі сталі, пов'язані з процесом зневуглецювання в агрегаті або при позапічній обробці і, отже, залежать від вмісту кисню і вуглецю в металі [28].

Спосіб виплавки сталі з низьким вмістом азоту, який передбачає підтримку реакції зневуглецювання для протікання деазотації сталі запропонований японськими авторами [29]. З цією метою пропонується вести процес при зниженому тиску і продовжити реакцію зневуглецювання зі швидкістю 0,005% на хвилину за рахунок добавок марганцевої, залізної, титанової або хромової руди з одночасною присадкою графіту або інших вуглецевмісних матеріалів для підтримки вмісту вуглецю в сталі на рівні 0,01%. Вміст азоту в сталі при цьому знижується до 0,001%. Існує й інший підхід, пов'язаний зі зв'язуванням азоту в нітрид за допомогою добавок різних нітридоутворюючих елементів.

Залежність властивостей сталі від вмісту домішок, неметалевих включень

Чистота сталі є технологічним параметром - фізичні і механічні властивості кінцевого сталевих продукту не повинні погіршуватися в результаті утворення небажаних неметалевих включень [30]. Найістотніше від кількості і морфології включень залежить якість і механічні властивості металу, що піддається холодній деформації, яким є кордова, канатна сталі, листові сталі глибокої витяжки та ін., особливо для виробів малої товщини (діаметру). Неметалеві включення, що утворюються в результаті розкислення, можуть знижувати технологічні показники сталі. Це відноситься до сталі як в рідкому (розливаємість металу), так і в твердому (деформованість при волочінні, обривність і т.інш.) стані і, в кінцевому підсумку, впливати на ефективність процесу виробництва сталі - вихід придатного.

Відомо, що НВ є концентраторами напружень при деформації, а на межі НВ - матриця відбувається різка зміна хімічного складу, типу кристалічної решітки, поляризації, намагніченості і т.д. [31]. В роботі [32] стверджується, що критичний розмір НВ для умов статичних випробувань - 6 ... 20 мкм, при гарячому куванні і прокатці 2,5 ... 3,5 мкм, що, однак, не підтверджено експериментальними даними.

Характеристика поняття «чиста сталь» для сталей різного сортаменту

Поняття «чиста сталь» з'явилося в металургії вже досить давно, проте як і раніше залишається дискусійним. З одного боку, вимоги стандартів до «чистоти сталі» за вмістом домішок посилюються рік від року. З іншого боку, сучасні уявлення про сталі, як композиційний матеріал, проявляються в перенесенні акценту на отримання точно заданого складу і розподілу фаз, знижуючи важливість власне «очищення» - зниження вмісту домішок (в тому числі НВ) [33]. На додаток до вимог щодо зниження вмісту неметалевих включень і контролю їх морфології, складу і розподілу, чиста сталь вимагає зменшення інших залишкових домішок в сталі [34,35], таких як сірка, фосфор, водень, азот і навіть вуглець, а також слідів елементів, таких як As, Sn, Sb, Se, Cu, Pb і Bi [33]. В роботі [35] автор вказує, що терміну «чиста сталь» зазвичай застосовують і до сталей з низьким вмістом розчинних елементів - сірки, фосфору, азоту, кисню і водню, і до сталей з низьким рівнем залишкових елементів - міді, цинку, свинцю, нікелю, хрому, вісмуту, олова, миш'яку і магнію, і до сталей з низькою частотою дефектів, пов'язаних з присутністю оксидів, що утворилися під час її виробництва, ковшової металургії і розливання.

Згідно [36] чистота визначається кількістю присутніх в металі оксидів або сульфідів, хоча карбіди або нітрид грають в деяких продуктах дуже важливу роль і також можуть розглядатися як неметалеві включення. Вимоги до «чистоти сталі» варіюється в залежності від марки сталі і її кінцевого призначення, як показано в таблиці 2.

Таблиця 2 - Максимальний нормований вміст домішок і розмір НВ в сталях різного сортаменту

Сталь	Максимальний вміст домішок, не більше	Максимальний розмір включень
ІФ сталі	[C] 30ppm, [N] 40ppm, O _{общ} 40ppm [37], [C] 10ppm[38], [N] 50ppm[39]	
Автомобільні та сталі для глибокої витяжки	[C] 30ppm, [N] 30ppm [40,41] O _{общ} 20ppm [42]	100μm [40-43]
Сталі для глибокої витяжки	[C] 30ppm, [N] 30ppm, O _{общ} 20ppm [40] O _{общ} 20ppm [41]	20μm [40] 20μm [41]
Леговані сталі для котлів	[P] 70ppm[44]	
Корозійно-стійкі сталі (газопроводні)	[P] 50ppm, [S] 10ppm[44, 45]	
Трубопроводні	[S] 30ppm [44], [N] 35ppm, O _{общ} 30ppm[46], [N] 50ppm[37], [S] 10ppm [41], O _{общ} 10ppm[44, 47]	100μm[40] и [41]+ контроль форми оксидів
Підшипникові	O _{общ} 10ppm[44, 47]	15μm[46, 47]
Шарики для підшипників	Ti 15 ppm O _{общ} 10ppm[42]	15μm[41]
Кордові	[H] 2ppm, [N] 40ppm, O _{общ} 15ppm[46]	10μm[46], 20μm для не пластичних НВ [41]
Товстолистові сталі	[H] 2ppm, [N] 30-40ppm, O _{общ} 20ppm[46]	Одиничні НВ 13μm [40], скупчення 200μm[40]
Дріт	[N] 60ppm, O _{общ} 30ppm[46]	20μm[46]

Кольорові метали (Cr, Ni і Cu) за літературними даними і на думку фахівців метизних підприємств збільшують час розпаду аустеніту і тим самим - час термічної обробки катанки-дроту. Однак, аналіз робіт [48,49] показує, що вміст Cr, Ni до 0,15 ... 0,20% кожного не робить істотного впливу на швидкість розпаду аустеніту. Підвищення вмісту

Cu з 0,04 до 0,45% збільшує час розпаду дуже незначно - менш 1 сек. Крім того, Cu збільшує втому витривалість сталі, а негативний вплив Cu на поверхневу червоноламкість сталі, утворення окалини, що погано видаляється, починає проявлятися при великих її концентраціях (більше 1%) і в присутності легкоплавких евтектик Pb, Sn [48].

Неметалеві включення та способи їх визначення

Відомо, що ступінь чистоти за НВ впливає на механічні властивості сталі: пластичність, зварюваність, поріг холодноламкості, схильність до ста-

ріння, анізотропію властивостей, контактну міцність і інші показники [32,35]. У таблиці 3 наведені загальні прояви впливу домішок сталі на її механічні властивості [42].

Таблиця 3 Вплив типових домішок на механічні властивості сталі [42]

Елемент	Форма	Механічні властивості, на які елемент впливає
S,O	Сульфідні та оксидні включення	Пластичність, ударна в'язкість, анізотропія, втомна міцність. Деформувемість (подовження, звуження). Здатність до холодної деформації, волочимість
C,N	Твердий розчин	Розчинність в твердому (підвищується), зміцнення
	Дислокації	Внутрішні напруження (схильність до старіння підвищується), пластичність і в'язкість (знижуються)
	Перлит і цементит	Дисперсність (підвищується), пластичність і в'язкість (знижуються)
	Карбіди та нітриди	Виділення, очищення зерна (підвищується), в'язкість (підвищується). Окрижність при міжзеренному виділенні
P	Твердий розчин	Розчинність в твердому (підвищується), зміцнення. Сегрегація, вторина окрижність, відпускну крижкість

Включення є причиною багатьох дефектів сталевих продукцій. Наприклад, в рулонах низьковуглецевої розкисленої алюмінієм спокійної сталі [39] виявляли тріщини, викликані включеннями, які ідентифікували як алюмінати - продукти окислення / розкислення, алюмінати кальцію з шлаку проковши і кристалізатора. Такі дефекти погіршують здатність автолиста до глибокої витяжки і неприйнятні [50].

В одному кілограмі типової низьковуглецевої спокійної сталі міститься 107 - 109 НВ [39], включаючи тільки 40 НВ розміром 80µm-130µm, 10 НВ розміром 130-200µm і менш одного НВ розміром 200-270µm [51]. Отже, виявлення рідкісних великих включень досить складне завдання. Зважаючи на складність виявлення великих включень, їх загальна об'ємна частка може бути більше [34]. Іноді причиною катастрофічних руйнувань може бути одиночне НВ, єдине у всій плавці. Тому, чиста сталь вимагає не тільки контролю вмісту включень в сталі, але і запобігання появи включень розміром більше критичного для даного виду продукції. Тому, багато видів сталі в таблиці 2 мають обмеження по максимально допустимому розміру НВ.

Існуюча класифікація НВ вельми різноманітна: за походженням, моментом утворення, хімічним складом, атомної кристалічної структури, макроструктури, температурі плавлення, механічній поведінці [51-54]. Найбільш часто НВ поділяють за походженням - на ендо- (утворюється в результаті реакцій в металі) і екзогенні (футеровка, шлаки і т.д.), що, однак, вельми умовно. З моменту утворення НВ ділять на первинні (процеси плавки і розкислення), вторинні (при охолодженні до температури кристалізації), третинні (в процесі кристалізації), четвертинні (після кристалізації) [51].

Лузгін В.П. [55] пропонує для визначення кількості НВ використовувати значення активності кисню в розплаві до і після розкислення, рівноважна з елементом - розкислювачем при температурі ліквідус і солідус. Складність такого поділу в тому,

що практично неможливо достовірно визначити активності при наявності декількох елементів - розкислювачів. Потрібно також відзначити, що вміст загального кисню, що дає уявлення про кількість НВ, і кисню активного не завжди кореспондують один з одним.

Класифікація за походженням вірна для випадку розкислення металу в сталеплавильних агрегатах. Оскільки зараз така практика зведена до мінімуму, а основна маса НВ утворюється в процесі плавки, на нашу думку, НВ по моменту утворення повинні відрізнятися на первинні (рідкий період), і вторинні (кристалізація і прокатка).

Узагальнюючи результати численних робіт, Г.М.Іцкович приходить до висновків [39] про те, що дослідження і металургійна практика досить переконливо довели основні положення процесів розкислення, утворення і видалення неметалевих включень в сталі, зокрема, достовірно встановлено, що неметалеві включення (оксиди, сульфідні, нітриди і складні з'єднання між ними) є продуктами реакцій кисню, сірки та азоту з компонентами сталі, а за джерелами їх утворення можуть бути ендогенними, екзогенними і екзоендогенними. Неметалеві включення утворюються на всіх п'яти етапах технологічного процесу (при плавці, випуску і розливання, розкисленні та модифікуванні сталі, кристалізації, охолодженні металу), причому їх кількість, розподіл в об'ємі металу, розмір, форма, склад і структура залежать від багатьох факторів. Об'єктивно визначити склад і структуру включень в сталі можна тільки комплексом методів: металографічного, мікрорентгеноспектрального і ін.

Питанням отримання низьких концентрацій фосфору і утворення карбідів присвячена велика кількість робіт, які показують, що на практиці досить стійко і в великих кількостях отримують метал з низьким вмістом цих НВ і з вмістом фосфору менше 0,005%. З точки зору якості сталі важливими є перспективи зниження рівня азоту на випуску металу до 30ppm, а також контроль рівня забруд-

нюючих елементів за допомогою технологій управління скрапом і додаванням точно необхідної кількості попередньо відновленого заліза [40]. На сьогодні завдання, пов'язані з видаленням фосфору, сірки і водню, практично вже мають ефективні рішення, і тільки питання, пов'язані з видаленням вуглецю, кисню, азоту та включень, залишаються відкритими.

Зміна складу і кількості неметалевих включень по ходу технологічного циклу

Дослідження характеру зміни вмісту домішкових елементів і НВ по ходу виробництва металу становлять істотний інтерес для вдосконалення технології позапічної обробки сталі. Важливість контролю вмісту в сталі кисню і НВ показана в роботах цілого ряду вітчизняних і зарубіжних авторів. Так, в роботі [38] визначено кількість НВ (шт/мм²) утворюються після введення SiCa і продувки аргонном, а також в кристалізаторі МБЛЗ. Встановлено, що по ходу процесу позапічної обробки металу кількість і розміри НВ зменшуються. У дослідженні [43] тих же авторів наведена зміна окислення сталі при позапічній обробці сталі. Виконані виміри вмісту активного кисню дозволили встановити характер зміни вмісту кисню по всьому технологічному циклу при позапічній обробці і розливці і причини переокислення низьковуглецевих 08Ю, СтЗсп і низьколегованої 10Г2БТ марок сталі. Значну увагу приділено аналізу впливу окислення сталі на вміст неметалевих включень в готовій сталі, визначених металографічними методами [43].

Активність кисню та поява неметалевих включень

Авторами [44] за допомогою кисневих зондів встановлені кореляційні залежності вмісту кремнію і алюмінію від активності кисню в сплавах складного складу. Проведені дослідження дозволили оцінити вміст легуючих і розкислюючих елементів в жароміцних сталях і дати рекомендації щодо оптимізації окислення сталі і вмісту зазначених елементів. Важливість стабілізації окислення сталі для якості металопродукції відзначають і автори [46], які виконали дослідження впливу найбільш значущих технологічних параметрів на переділі конвертер-УДМ-розливання стосовно виробництва низьковуглецевих сталей. Використання розроблених номограм розкислення за значенням окислення сталі, хімічного складу металу і його температури дозволили оптимізувати параметри технології розкислення і знизити рівень відсортуння прокату по дефекту «рвана кірка».

Автори [45] досліджували зміну вмісту кисню по всьому циклу позапічної обробки сталі марки ORVAR SUPREME на зразках, відібраних з трьох плавов. Зразки були взяті на різних стадіях процесу: після доставки ковша на станцію ковш-піч (КП); після дегазації; під час додавання алюмінію; після додавання алюмінію; після додавання легуючих елементів; до вакуумної дегазації; після дегазації. Значення активності кисню були виміряні на різних стадіях обробки в ковші та в ЕДП до розкислення і додавання легуючих елементів (таблиця 4).

Таблиця 4 - Активність кисню в сталевому розплаві на різних стадіях технологічного процесу

Стадія процесу * ЕДП – електродугова піч ** КП – ковш-піч	Активність кисню при концентрації розчиненого кисню в 1 віс. %
1. До розкислення і додавання легуючих елементів в ЕДП *	0,02 – 0,05
2. До видалення шлаку в КП **	0,001
3. Після додавання алюмінію	0,0001 – 0,0002
4. До вакуумної дегазації	0,0001 – 0,0004
5. Після вакуумної дегазації	0,0001 – 0,0002

Ретельне дослідження неметалевих включень, вилучених з проб промислової сталі, свідчать про те, що у всіх марках сталі зустрічаються включення шести основних морфологічних типів: сферичні, багатогранні, пластинчасті, дендрити, скупчення і агрегати. Зазвичай вважається, що тривала витримка в ковші надає сприятливу дію, так як це дозволяє включенням спливати на поверхню і потрапити в шлак. Проведене авторами дослідження показало, що скупчення, що утворилися під час розкислення, зникають протягом ~ 15 хвилин після додавання алюмінію, що підтверджується даними інших дослідників, які також спостерігали швидке видалення включень великого розміру. Збільшення розміру агрегатів і багатогранників великого розміру свідчить про те, що зчеплення неметалевих включень грає важливу роль в утворенні великих частинок шкідливих домішок. У НВ маленького розміру, головним чином у сферичних і багатогранних частинок і, в меншій мірі, у пластинок, ні розмір, ні склад не змінюються (Рисунок 3).

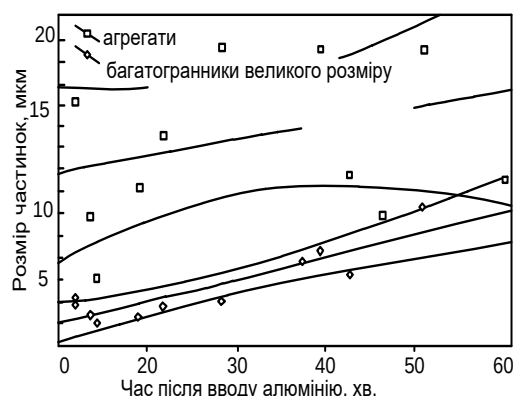


Рисунок 3 - Зміна розміру агрегатів і великих багатогранників, вилучених зі сталі LCAK декількох плавов, в залежності від часу після додавання алюмінію [45]

Так як загальний вміст кисню в процесі обробки в ковші після видалення найбільших включень залишається приблизно на одному рівні, можна при-

пустити, що встановлюється динамічна рівновага між видаленням включень і повторним окисленням. Вважається, що рушійна сила утворення нових частинок занадто мала через велику кількість включень, присутніх в сталевій ванні, які будуть виконувати роль центрів зростання.

Вплив алюмінію та кальцію на формування неметалевих включень

Авторами [45] також встановлено, що присадка алюмінію впливає на хімічний склад включень. Розкислення сталеві ванни алюмінієм не тільки призводить до утворення глиноземистих включень, але також і до зміни складу включень типу шпінелі. Було встановлено, що чисті глиноземисті включення швидко зникають. Проведене дослідження показало, що в утворенні включень типу шпінелі грає важливу роль «ковшова глазур». Перед випуском сталі в ній спостерігалися включення тільки одного типу, можливо, це твердий розчин чотирьохкомпонентного з'єднання Al_2O_3 , CaO , FeO і MgO .

Цікавим є і детальне дослідження, виконане авторами [48]. Показано, що в процесі вторинної металургійної обробки може відбутися істотне зниження вмісту розчиненого алюмінію, що пояснюється його окисленням. Так як це окислення обумовлено реакціями на межі поділу фаз, тобто фаз сталь-шлак, зниження вмісту алюмінію не обов'язково пов'язане тільки з ростом оксидних включень. Від початку позапічної обробки і до розливання температура рідкої сталі знижується на ~ 50 K. Зниження розчинності кисню в сталі викликає виділення оксиду алюмінію. З огляду на повільне зниження температури, осадження буде відбуватися на існуючих включеннях. Для визначення впливу охолодження сталі на зростання включень було розраховано вплив осадження оксиду алюмінію зі сталі. Для простоти розглядали тільки включення сферичної форми з вихідним діаметром 0,5 і 10 мкм. Рідка сталь містила в цілому 30 ppm кисню, з яких 25 ppm становив пов'язаний кисень у включеннях з оксиду алюмінію, а

5 ppm - кисень, розчинений у розплаві. Зниження вмісту розчиненого кисню до 2 ppm призвело в результаті до зростання (в діаметрі) включень розміром в 0,02 і 0,38 мкм до 0,5 і 10 мкм відповідно. Такий простий розрахунок показав, що зростання, обумовлене охолодженням, навряд чи можна виявити при вимірюванні включень. Якщо розглядати тільки спливання включень на поверхню, то збільшення тривалості витримки сталі в ковші повинно було б підвищити чистоту сталі. Однак, оскільки під час вторинної металургійної обробки агрегати і великі багатогранники збільшилися в розмірі, можна припустити, що найчистіша сталь, з точки зору розміру включень, виходить приблизно через 15 хвилин після розкислення.

Дослідники [56] показують, що контроль формування неметалевих включень і ідентифікація складових їх фаз є важливим для отримання чистої сталі. Проведене ними узагальнення даних, показує, що отримання в сталі заданого співвідношення загального вмісту алюмінію і кальцію в сталі дозволяє управляти типом включень, що формуються. Так, формування сульфідів кальцію можливо в тому випадку, коли вміст сірки і кальцію досить великі.

Оскільки спорідненість кальцію до кисню більше, ніж до сірки, добавка його спочатку призводить до перетворення оксидів алюмінію в алюмінати кальцію, а формування сульфідів відбувається тільки, якщо збільшувати присадку кальцію. Сульфіди кальцію при температурах сталеплавильного виробництва є твердими, що є однією з причин затягування стакану при розливанні, оскільки перетворення оксиду алюмінію в алюмінати кальцію відбувається поки включення знаходяться в рідкому вигляді (рисунки 1.4). Вміст кальцію, при якому всі оксиди будуть в рідкому стані і утворюються тверді сульфіди, знаходиться в так званому оптимальному вікні обробки кальцієм. Метою обробки кальцієм є досягнення цього рівня концентрацій. Точне розташування «вікна» залежить від вмісту в сталі сірки і загального вмісту кисню.

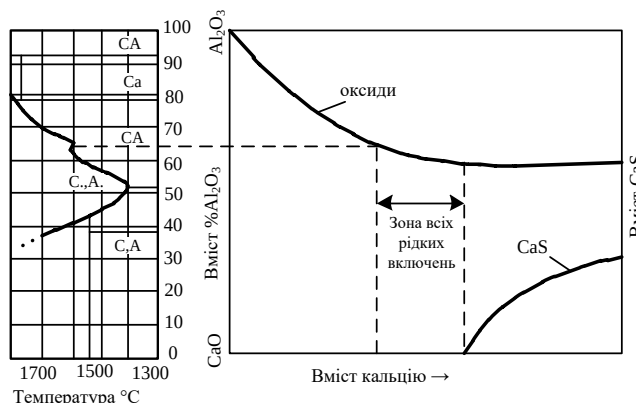
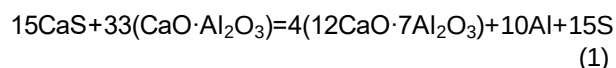


Рисунок 4 - Зміна складу включень в процесі присадки кальцію [56]

Так, для формування рідких включень $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ вміст алюмінію і сірки повинні бути менше рівноважного по реакції (1)



$$\text{Константа рівноваги реакції: } K = \frac{a_{\text{CaS}}^{15} h_{\text{S}}^{15} h_{\text{Al}}^{10}}{a_{\text{CaS}}^{15} a_{\text{Ca}}^{33}},$$

де a_i - активність в чистому стандартному стані, h_i - активність для 1% вмісту в стандартному стані.

Активність Ca ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) дорівнює одиниці, а активність S_{12A_7} змінюється від 0,8 до 1,0 в залежності від реального складу включень. Активність CaS , як встановлено, має бути 0,75 - 0,1. Для отримання рідких алюмініатів кальцію складу сталі повинен бути нижче S_{12A_7} . Якщо кальцій буде введений в сталь з вмістом алюмінію і сірки більш лінії S_{12A_7} , включення глинозему будуть перетворені в Ca . Кальцій потім реагує з сіркою до того часу, поки її вміст не виявиться нижче лінії формування рідких включень. Для повного контролю включень з переведенням їх в алюмініати кальцію вміст сірки має бути низьким [56].

Для поліпшення чистоти сталі важливе значення мають властивості шлаку. Зокрема, вважається, що безпосередній вплив на чистоту сталі надає величина відношення $\% \text{CaO} / \% \text{Al}_2\text{O}_3$, основність шлаку, плинність і активність в ньому кисню. Для ефективного контролю цих показників корейськими авторами [49] на заводі фірми POSCO була змінена схема розкислення підшипникової сталі і склад шлаку. Контроль відношення $\% \text{CaO} / \% \text{Al}_2\text{O}_3$ є найбільш ефективним методом виведення включень з підшипникової сталі, найкраще їх видалення досягається при значенні 1,7-1,8. При оптимізованій технології розкислення і складі кінцевого шлаку загальний вміст кисню знизився з 10 - 12% до 5 - 8% [49].

Характер неметалевих включень і стабільність розливання сталі

В сучасних електросталеплавильних цехах з метою підвищення продуктивності установок безперервного розливання сталі (УБРС) і машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) при розливанні сталі однієї марки, як відомо, передбачають розливання заготовки методом «плавка на плавку» [19,21]. При цьому ефективність роботи УБРС і МБЛЗ оцінюють по виходу придатного металу, машинному часу розливання, продуктивності струмка, а також зменшенні простоїв. Для підтримки високої ритмічності і безперервності процесу розливання сталі потрібне вирішення комплексу задач, пов'язаних із забезпеченням відповідної стійкості футеровки проміжного ковша, вогнетривкої частини його розливних пристроїв, а також швидкою заміною при виході з ладу склянок-дозаторів, які використовують для розливання і захисту розливаемого металу від вторинного окислення на ділянці проміжний ковш - кристалізатор.

Аналіз публікацій, пов'язаних з вирішенням проблеми затягування, показує, що автори, в основному, пропонують вирішувати цю проблему шляхом використання вдосконалених вогнетривких виробів, пристосувань (ущільнювальні прокла-

дки, продування аргонем і т. Д.), що знижують вторинне окислення металу в місці стиковки вогнетриву і т. п. Необхідно відзначити, що при виплавці корозійностійких вуглецевих низьколегованих трубних сталей і сталей конструкційних марок, крім використання сучасних вогнетривів, особливу увагу [57,58] приділяються технології позапічного рафінування сталі на агрегаті «ковш-піч». Разом з тим, на деяких слябових і блюмової МБЛЗ [59] для зниження гостроти проблеми із затягуванням склянок-дозаторів пішли по шляху збільшення діаметра внутрішнього каналу до 50-60мм.

Залежно від ступеня відкладень виникають різні проблеми: зменшення ефективного перетину каналу сталерозливочного вузла проміжного ковша, обмеження кількості металу, що розливається через один струмок, повне переривання процесу, зниження якості заготовки [57,60]. В період заміни заглибного стакану (30-90с) формується ділянка зливка, що підлягає вибракуванню. В результаті циклічних коливань навантаження на опори роликів криволінійної МБЛЗ на порядок перевищує амплітуду коливань при розливанні з постійною швидкістю, виходять з ладу підшипники і самі ролики. Крім того, перекриття сталевипускного каналу проміжного ковша на період заміни склянки призводить до затягування каналу, а необхідність пропалювати його киснем знижує якість безперервного злитка, збагачуючи його ендегенними включеннями, і створює аварійну ситуацію на розливному майданчику.

Як стверджується в роботі [60], основним засобом забезпечення розливання розкисленої алюмінієм сталі є трансформація включень глинозему в рідкі алюмініати кальцію. Ніякими іншими способами в даний час ця проблема кардинально не вирішується. При здійсненні технології обробки сталі кальційвміщуючими реагентами найбільш часто не надають значення двом факторам: використання співвідношення $[\text{Ca}]/[\text{Al}]_{\text{заг}}$ без урахування і контролю $[\text{Al}]_{\text{окс}}$; вторинному окисленню в вогнетривких провідках. Проведений аналіз літературних джерел показав, що в рекомендованих співвідношеннях $[\text{Ca}]/[\text{Al}]$ для запобігання заростання розливних каналів спостерігаються помітні коливання як розрахункових, так і промислових даних. На фірмі «Nippon Steel», наприклад, нижня межа співвідношення $[\text{Ca}]/[\text{Al}]_{\text{заг}}$ змінюється в межах 0,05-0,085 (при верхньому 0,125) для різних марок сталі. У той же час в роботі [61] відношення $[\text{Ca}]/[\text{Al}]_{\text{заг}}$ для успішного розливання металу рекомендується в межах 0,11-0,15. Це підтверджує висновки про необхідність уточнення робочого способу обробки сталі кальцієм в умовах конкретного цеху, так як при однаковому співвідношенні $[\text{Ca}]/[\text{Al}]_{\text{заг}}$ в одних випадках розливання проходить без зауважень, а іноді спостерігаються випадки заростання склянок [61].

Найбільш важливим параметром, на думку [60], своєрідним регулятором розливання металу, є співвідношення $[\text{Ca}]/[\text{Al}]_{\text{окс}}$. Важливо відзначити,

що при температурах безперервного розливання сталі (1550-1580°C) алюмінатні включення будуть перебувати в рідкому вигляді при $[Ca]/[Al]_{окс} = 0,8-$

1,6, що говорить про необхідність підтримки вмісту $[Al]_{окс}$ в сталі на низькому рівні (не більше 0,002-0,003%) протягом всієї серії розливання [62].

Бібліографічний опис

1. Fruehan, R.J., H.W. Paxton, F. Giarratani, L. Lave. (1995) The Future Steelmaking Industry and Its Technologies, INEL-95/0046. Sloan Steel Industry Competitiveness Study, Carnegie Mellon University. Berry B., Ritt A. Grayssel M. Retrospectives of twentieth century steel//New steel.-November 1999.
2. Внедрение технологии производства катанки для высокопрочных арматурных канатов /А.Б.Сычков, М.А.Жигарев, С.Ю.Жукова, О.Л.Кучеренко, И.В.Репин. – Сталь. – 2010. - №1. – с.77...79.
3. Лопухов Г.А. Применение кислорода в дуговых сталеплавильных печах// Электрометаллургия.-2005.- № 3.- С. 2-26.
4. Смирнов А.Н. Процессы непрерывной разливки: Монография / А.Н.Смирнов, В.Л.Пилюшенко, А.А.Минаев и др. – Донецк: ДонНТУ, 2002.-536с.
5. FERNANDES, M., CHEUNG, N., GARCIA, A. Mat. Characterization, v. 48, p. 255-261, 2002. Materials Characterization Volume 48, Issue 4, June 2002, Pages 255–261 Investigation of nonmetallic inclusions in continuously cast carbon steel by dissolution of the ferritic matrix
6. Бойко В. С., Якін М. М., Коваль С. О., Стефанець А. В., Фентісов І. М., Годинський О. А., Чичкарьов Є. А. Оптимізація розкислення сталі з використанням даних про активність розчиненого кисню. МЕТАЛЛ І ЛИТ'Є УКРАЇНИ № 2-3 (225-226) '2012. С.12-15.
7. Modification of oxide inclusions present in aluminum-killed low carbon steel by addition of calcium. 2004. Rem Revista Escola de Minas 57(3). DOI:10.1590/S0370-44672004000300008. METALURGIA & MATERIAIS. José Carlos S. Pires, A. Garcia
8. Arch. Metall. Mater., Vol. 61 (2016), No 1, p. 275–278. DOI: 10.1515/amm-2016-0052. M. Warzecha, S. Garncarek, T. Merder, z. Skuza. Identification of relevant work parameters of ladle furnace while melting the high ductility steel and high-carbon steel.
9. Парусов Э.В., Парусов В.В., Луценко В.А., Парусов О.В., Чуйко И.Н. Оптимальные характеристики качества катанки из высокоуглеродистой стали // Метизы. № 3. 2006. С. 34-36.
10. Парусов В.В., Нестеренко А.М., Сычков А.Б., Старов Р.В., Парусов О.В. Разработка сквозной технологии производства катанки из качественной углеродистой стали в условиях ММЗ // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 2. С. 52-54.
11. Case Study and Analysis of the Production Processes in a Steel Factory in Jordan. Jamil J. Al Asfar, Ashraf Salim. World Renewable Energy Congress 2011 – Sweden Industrial Energy Efficiency (IEE). 8-13 May 2011, Sweden. 1708-1715.
12. Fruehan, R.J., Fortini, O., Paxton, H.W., Brindle, R. 2000. Theoretical Minimum Energies to Produce Steel for Selected Conditions. Energetics, Inc., Columbia, MD, US Department of Energy Office of Industrial Technologies Washington, DC.
13. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В./Непрерывная разливка стали/Учебник. - Донецк: ДонНТУ, 2011. - 482 с. - рус.
14. Shifrin V., Popenov A., Coudurier L., Devaux M. Further advances in EAF efficiency with Pyrejet burner injection//Steel Times.-2000.- №9.-P.281-282.
15. Pravin C. Mathur Results using CoJet injection//Steel Times International.- 2002.- vol. 26.-№5.- P. 42 – 43.
16. Batham J., Cameron A. Optimized energy injection for the Electric Arc Furnace//Steel Times.-2002.- №2.-P.31-37.
17. Гудим Ю. А., Зиннуров И. Ю., Киселев А.Д., Шумаков А.М. Рациональные способы интенсификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах// Электрометаллургия.-2005.- № 9.- С. 2-6.
18. Мичилан А., Лаварони Г., Фиор А. Печь Danarc фирмы Danieli в плавильном цехе завода фирмы ABS //Электрометаллургия.-2000.-№ 4.-С.8-14.
19. Тулуевский Ю. Н., Мизин В. Г., Зинуров И. Ю. и др. Факельно-дуговые процессы электроплавки // Сталь.- 1988.- № 8.- С. 42-46.
20. Пат. РФ. № 18387736. Дуговая сталеплавильная печь. Тулуевский Ю. Н., Мянник А. Г., Зинуров И. Ю. и др.
21. Розе Л. Передовая технология выплавки стали - универсализация с учетом доступности сырья и затрат на его приобретение//Черные металлы.-2005.-№7-8.-С.37-44.
22. Аргента П., Ферри М. Б. Технология выплавки стали в электродуговых печах: новые рекорды производительности// Черные металлы.- 2005.-№7-8.-С.44-48.
23. Голд Л. Примеры новых технологий фирмы VAI для черной металлургии//Черные металлы. - 2005.-№2.-С.76-83.
24. Fruehan, R.J., H.W. Paxton, F. Giarratani, L. Lave. (1995) The Future Steelmaking Industry and Its Technologies, INEL-95/0046. Sloan Steel Industry Competitiveness Study, Carnegie Mellon University. Berry B., Ritt A. Grayssel M. Retrospectives of twentieth century steel//New steel.-November 1999.
25. Кислинг Р. Чистая сталь - дискуссионное понятие // В кн. Чистая сталь.Сб.научн.тр. Пер. с англ.- М.:Металлургия,1987.- С.9-18.
26. Morrison W.B.Nitrogen in the Steel Product//Ironmaking & Steelmaking.-Vol. 16 (2).-1989.-123-130.
27. Cramb A.W.High Purity, Low Residual, and Clean Steels. In Impurities in Engineering Materials. Impact, Reliability, and control. New York. Basel: Marcel Dekker, Inc.,1999.-P.49-89.
28. Dyson D. J., Rose A. J., Whitwood M.M.,Wilcox D. P.Studies in development of clean steels. Part 2: Use of chemical analysis//Ironmaking & Steelmaking.- 1998.-v. 25.-№ 4.-P. 279-286.
29. Разработка ультравысокопрочной стальной проволоки. Т.Тахахаим, Х.Сато, И.Очиан, Ниппон стил. Технический отчет № 53, апрель 1992-С. 101-106.

30. Hirashima N., Nishihara R., Takasaki Y. et al//Development of Process for Producing Extremely Low Carbon Steel at Nippon Steel, Yawata Works//La Revue de Metallurgie.-CIT.-Vol. 97 (3).-2000.-P. 309-315.
31. Губенко С.И. Неметаллические включения в стали. /Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В.-Д.: Арт-пресс, 2005.-536 с.
32. Ogawa K.Slag Refining for Production of Clean Steel// Proceedings of 143th & 144th Nishiyama Technical Symposium, (Tokyo, Osaka, Japan), Iron and Steel Institute of Japan, 1992.-P. 211-219.
33. B.Debiesme, Poissonnet I., Choquet P., Penet F. Steel Cleanliness at Sollac Dunkerque//Revue de Metallurgie-CIT.-Vol. 90 (3).-1993.-P. 387-394.
34. Goransson M., Reinholdsson F. Willman K. Evaluation of Liquid Steel Samples for the Determination of Micro-Inclusion Characteristics by Spark-Induced Optical Emission Spectroscopy// I & S maker.-Vol. 26 (5).-1999.-P. 53-58.
35. Chakraborty S., Hill W. Improvement in Steel Cleanliness at Great Lakes No.2 Continuous Caster// 78th Steelmaking Conference Proceedings.- Vol. 78.- Warrendale, PA: ISS, 1995.- P. 401-413.
36. Hansen T., Jonsson P. Some ideas of Determining the Macro Inclusion Characteristic during Steel-making// 2001 Electric Furnace Conference Proceedings, Vol. 59.- 2001.-P.71-81.
37. Явойский В.И., Близнюков С.А., Вишкарёв А.Ф., Горохов Л.С. /Поведение кислорода и оксидных включений при кристаллизации и последующих охлаждениях стали // Сталь.-1975.- № 1.- С. 26-31.
38. Лузгин В.П. Кислород и механизм его влияния на свойства стали // Сталь.- 1999.-№ 10.- С. 22-26.
39. Ицкович Г.М. Неметаллические включения в стали // Сталь.- 1974.-№3.- С. 590-616.
40. Birat J.-P. Impact of steelmaking and casting technologies on processing and properties of steel//Ironmaking and Steelmaking.- 2001.- Vol. 28.- № 2.-P. 152-158.
41. Лузгин В.П., Близнюков С.А. Проблема кислорода и качества стали на пороге XXI века. // Труды Международной конференции, посвященной 90- летию В.И.Явойского, Киев - Днепропетровск, 1991, - С. 59-62.
42. Gao H. Source and Control Measures of Hydrogen, Nitrogen and Oxygen in Steel//Steelmaking (in Chinese).-Vol. 16 (2).- 2000.-P. 38-43.
43. Лузгин В.П., Качеван А.В., Близнюков А.С. Изменение содержания кислорода при внепечной обработке стали//Известия ВУЗов. Черная металлургия.-№1.-2001.-С.10-13.
44. А.М.Косырев, А.А. Иванов, О.А. Вальдман и др. Оценка содержания элементов раскислителей в прецизионном сплаве с помощью кислородных зондов//Черная металлургия.-1991.-№8.-С.41-42.
45. Beskow K., Jia J., Lupis C. H. P., Sichen D. Chemical characteristics of inclusions formed at various stages during the ladle treatment of steel// Ironmaking and Steelmaking.- 2002.- Vol. 2.- No. 6.- P.427-435.
46. Герман В.И., Добромилов А.А., Саврасов А.И., Швецов А.Н. Стабилизация окисленности кипящей стали.- Сталь.-№6.-2000.- С. 28-30.
47. T.Lipiński, A. Wach. Size of Non-Metallic Inclusions in High-Grade Medium Carbon Steel. Archives of foundry engineering volume 14, issue 4/2014, 55-60
48. Dekkers R., Blanpain B., Wollants P. at al. Non-metallic inclusions in aluminium-killed steels// Ironmaking and Steelmaking.- 2002.-Vol. 29.- No. 6.-P. 437.
49. Yoon B.-H., Heo K.-H., Kim J.-S., Sohn H.-S. Improvement of steel cleanliness by controlling slag composition// Ironmaking and Steelmaking.- 2002.- Vol. 29.-No. 3.-P. 215 – 218.
50. Камкина Л.В. Вплив технологічних чинників на утворення неметалевих включень вуглецевої сталі та технологічні рекомендації по зниженню їх кількості. /Камкина Л.В., Безшкуренко О.Г., Сокур Ю.І., Надточій А.А., Манідин В.С. // Сучасні проблеми металургії. – 2014. - №17.- С.106-115.
51. Кислинг Р., Ланге Н. Неметаллические включения в стали.-М.:Металлургия,1968.-124 с.
52. Губенко С.И. Трансформация неметаллических включений в стали.-М.: Металлургия,1991.-225с.
53. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Оленко А.П. Неметаллические включения и свойства стали. М.:Металлургия, 1980. - 176 с.
54. Э.Эльсмер, К.Х. Кнапп, Д.Амелинг и др. Шлаковые и оксидные включения при непрерывном литье стали//Черные металлы.-1977 -№ 23.-С. 17-22.
55. Кислородные зонды в сталеплавильном производстве/Лузгин В.П., Зинковский И.В., Покидышев В.В., Иванов А.А.-М.: Металлургия,1989 (Проблемы сталеплавильного производства).- 144с.
56. Pires J.C.S., Garcia A. Modification of oxide inclusions present in aluminium-killed low-carbon steel by addition of calcium //pires@fem.unicamp.br
57. Гаук Ф., Петшке Ю. Износ погружных стаканов и образование отложений глинозема при непрерывной разливке стали // Огнеупоры для МНЛЗ: конф. – М.: Металлургия, 1986.- С.62-75.
58. Сарычев А.В., Николаев О.А. и др. Опыт подготовки металла для разливки на сортовых МНЛЗ // Сталь. - 2007. - №2. – С.44-45.
59. А.Н. Смирнов, А.В.Кравченко, А.П.Верзилов. Совершенствование методов моделирования и оптимизация параметров систем дозирования стали в кристаллизаторе слэбовой МНЛЗ. Наукові праці ДонНТУ, 2011. Металургія Випуск 13 (194). С.98-107.
60. Preventions of Nozzle Clogging During the Continuous Casting of Al-Killed Steel / V.Yves, C.Bert, B.Bsr et al. // Steelmaking Conference Proceedings. – 2000. – P. 175-181.
61. Дюдкин Д. А. Особенности комплексной дегазации на властвости рідкої і твердої сталі // Сталь. - 1999. - № 1. - С. 20-25.
62. Dyson D. J., Rose A. J., Whitwood M.M., Wilcox D. P. Studies in development of clean steels. Part 2: Use of chemical analysis//Ironmaking & Steelmaking.- 1998.-v. 25.-№ 4.-P. 279-286.

References

1. Fruehan, R.J., H.W. Paxton, F. Giarratani, L. Lave. (1995) The Future Steelmaking Industry and Its Technologies, INEL-95/0046. Sloan Steel Industry Competitiveness Study, Carnegie Mellon University. Berry B., Ritt A. Grayssel M. Retrospectives of twentieth century steel//New steel.-November 1999.
2. Implementation of wire rod production technology for high-strength reinforcing ropes / A.B. Sychkov, M.A. Zhigarev, S.Yu. Zhukova, O.L. Kucherenko, I.V. Repyn. - Steel. - 2010. - #1. - pp. 77...79.
3. Lopukhov G.A. Use of oxygen in arc steel melting furnaces// Elektrometallurgiya. -2005.- No. 3.- P. 2-26.
4. Smirnov A.N. Processes of continuous pouring: Monograph/ A.N.Smirnov, V.L.Pilyushenko, A.A.Minaev and others - Donetsk: DonNTU, 2002.-536p.
5. FERNANDES, M., CHEUNG, N., GARCIA, A. Mat. Characterization, v. 48, p. 255-261, 2002. Materials Characterization Volume 48, Issue 4, June 2002, Pages 255–261 Investigation of nonmetallic inclusions in continuously cast carbon steel by dissolution of the ferritic matrix
6. Boyko V. S., Yakin M. M., Koval S. O., Stefanets A. V., Fentisov I. M., Godynskyi O.A., Chychkarev E.A. Optimization of steel deoxidation using data on the activity of dissolved oxygen. METAL AND FOUNDRY OF UKRAINE No. 2-3 (225-226) 2012. P.12-15.
7. Modification of oxide inclusions present in aluminum-killed low carbon steel by addition of calcium. 2004. Rem Revista Escola de Minas 57(3). DOI:10.1590/S0370-44672004000300008. METALLURGY & MATERIALS. José Carlos S. Pires, A. Garcia
8. Arch. Metal. Mater., Vol. 61 (2016), No. 1, p. 275–278. DOI: 10.1515/amm-2016-0052. M. Warzecha, S. Garncarek, T. Merder, Z. Skuza. Identification of relevant work parameters of ladle furnace while melting the high ductility steel and high-carbon steel.
9. Parusov E.V., Parusov V.V., Lutsenko V.A., Parusov O.V., Chuyko I.N. Optimum characteristics of the quality of wire rod from high-carbon steel // Metizy. No. 3. 2006. P. 34-36.
10. Parusov V.V., Nesterenko A.M., Sychkov A.B., Starov R.V., Parusov O.V. Development of a through-flow technology for the production of wire rod from high-quality carbon steel in the conditions of MMZ // Metallurgical and mining industry. 2002. No. 2. P. 52-54.
11. Case Study and Analysis of the Production Processes in a Steel Factory in Jordan. Jamil J. Al Asfar, Ashraf Salim. World Renewable Energy Congress 2011 - Sweden Industrial Energy Efficiency (IEE). 8-13 May 2011, Sweden. 1708-1715.
12. Fruehan, R.J., Fortini, O., Paxton, H.W., Brindle, R. 2000. Theoretical Minimum Energies to Produce Steel for Selected Conditions. Energetics, Inc., Columbia, MD, US Department of Energy Office of Industrial Technologies Washington, DC.
13. Smirnov A.N., Kubersky S.V., Stepan E.V./Continuous casting of steel/Textbook. - Donetsk: DonNTU, 2011. - 482 p. - Russian
14. Shifrin V., Popenov A., Coudurier L., Devaux M. Further advances in EAF efficiency with Pyrejet burner injection//Steel Times.-2000.- No.9.-P.281-282.
15. Pravin C. Mathur Results using CoJet injection//Steel Times International. - 2002.- vol. 26.-№5.- R. 42-43.
16. Batham J., Cameron A. Optimized energy injection for the Electric Arc Furnace//Steel Times.-2002.- №2.-P.31-37.
17. Gudym Yu. A., Zinnurov I. Yu., Kiselev A. D., Shumakov A. M. Rational methods of intensification of melting in modern arc steelmaking furnaces // Elektrometallurgiya.-2005.- No. 9.- P. 2-6.
18. Mychilan A., Lavarony G., Fior A. Danarc furnace of the Danieli firm in the melting shop of the ABS plant // Elektrometallurgiya.-2000.-№4.-S.8-14.
19. Tuluevsky Yu.N., Myzyn V.G., Zinurov I.Yu., etc. Torch-arc processes of electrofusion // Stal.- 1988.- No. 8.- P. 42-46.
20. Pat. Russian Federation No. 18387736. Arc steel melting furnace. Tuluevsky Yu.N., Myannyk A.G., Zinurov I.Yu. and others.
21. Rose L. Advanced technology of steel smelting - universalization taking into account the availability of raw materials and the costs of its acquisition//Черные металлы.-2005.-№7-8.-С.37-44.
22. Argenta P., Ferry M.B. Steel smelting technology in electric arc furnaces: new performance records// Черные металлы.- 2005.-№7-8.-S.44-48.
23. Gold L. Examples of new technologies of the VAI company for black metallurgy//Черные металлы.- 2005.-№2.-С.76-83.
24. Fruehan, R.J., H.W. Paxton, F. Giarratani, L. Lave. (1995) The Future Steelmaking Industry and Its Technologies, INEL-95/0046. Sloan Steel Industry Competitiveness Study, Carnegie Mellon University. Berry B., Ritt A. Grayssel M. Retrospectives of twentieth century steel//New steel.-November 1999.
25. Kisling R. Clean steel - discussion concept // In book. Pure steel. Sat. scientific tr. Trans. with English - M.: Metallurgy, 1987. - P.9-18.
26. Morrison W.B. Nitrogen in the Steel Product//Ironmaking & Steelmaking.-Vol. 16 (2).-1989.-123-130.
27. Cramb A.W. High Purity, Low Residual, and Clean Steels. In Impurities in Engineering Materials. Impact, Reliability, and control. New York. Basel: Marcel Dekker, Inc., 1999.-P.49-89.
28. Dyson D. J., Rose A. J., Whitwood M. M., Wilcox D. P. Studies in development of clean steels. Part 2: Use of chemical analysis//Ironmaking &
29. Development of ultra-high-strength steel wire. T. Takahaim, H. Sato, I. Ochian, Nippon style. Technical Report No. 53, April 1992-S. 101-106.
30. Hirashima N., Nishihara R., Takasaki Y. et al//Development of Process for Producing Extremely Low Carbon Steel at Nippon Steel, Yawata Works//La Revue de Metallurgie.-CIT.-Vol. 97 (3).-2000.-P. 309-315.
31. Gubenko S.I. Non-metallic inclusions in steel. / Gubenko S.Y., Parusov V.V., Derevyanchenko I.V.-D.: Art-press, 2005.-536 p.

32. Ogawa K. Slag Refining for Production of Clean Steel// Proceedings of 143th & 144th Nishiyama Technical Symposium, (Tokyo, Osaka, Japan), Iron and Steel Institute of Japan, 1992.-R. 211-219.
33. B. Debiesme, Poissonnet I., Choquet P., Penet F. Steel Cleanliness at Sollac Dunkerque//Revue de Metallurgie-CIT.-Vol. 90 (3).-1993.-P. 387-394.
34. Goransson M., Reinholdsson F. Willman K. Evaluation of Liquid Steel Samples for the Determination of Micro-Inclusion Characteristics by Spark-Induced Optical Emission Spectroscopy// I & S maker.-Vol. 26 (5).-1999.-R. 53-58.
35. Chakraborty S., Hill W. Improvement in Steel Cleanliness at Great Lakes No.2 ContinuousCaster// 78th Steelmaking Conference Proceedings.- Vol. 78.- Warrendale, PA: ISS, 1995.- P. 401-413.
36. Hansen T., Jonsson P. Some ideas of Determining the Macro Inclusion Characteristic during Steel-making// 2001 Electric Furnace Conference Proceedings, Vol. 59.- 2001.-P.71-81.
37. Yavoiskii V.Y., Bliznyukov S.A., Vyshkarev A.F., Gorokhov L.S. /Behavior of oxygen and oxide inclusions during crystallization and subsequent cooling of steel // Stal.-1975.- No. 1.- P. 26-31.
38. Luzhin V.P. Oxygen and the mechanism of its influence on the properties of steel // Stal.- 1999.-№ 10.- P. 22-26.
39. Itskovich H.M. Non-metallic inclusions in steel // Stal.- 1974.-№3.- P. 590-616.
40. Birat J.-P. Impact of steelmaking and casting technologies on processing and properties of steel//Ironmaking and Steelmaking.- 2001.- Vol. 28.- No. 2.-R. 152-158.
41. Luzgin V.P., Bliznyukov S.A. The problem of oxygen and steel quality at the threshold of the 21st century. // Proceedings of the International Conference dedicated to the 90th anniversary of V. I. Yavoisk, Kyiv - Dnepropetrovsk, 1991, - pp. 59-62.
42. Gao H. Source and Control Measures of Hydrogen, Nitrogen and Oxygen in Steel//Steelmaking (in Chinese).-Vol. 16 (2).- 2000.-P. 38-43.
43. Luzgin V.P., Kachevan A.V., Bliznyukov A.S. Changes in the oxygen content during blast-furnace processing of steel//Izvestia VUZov. Black metallurgy.-№1.-2001.-P.10-13.
44. A.M. Kosyrev, A.A. Ivanov, O.A. Valdman et al. Estimation of the content of deoxidizing elements in a precision alloy using oxygen probes//Chernaya metallurgy.-1991.-№8.-S.41-42.
45. Beskow K., Jia J., Lupis C. H. P., Sichen D. Chemical characteristics of inclusions formed at various stages during the ladle treatment of steel// Ironmaking and Steelmaking.- 2002.- Vol. 2.- No. 6.- R. 427-435.
46. Herman V.Y., Dobromylov A.A., Savrasov A.I., Shvetsov A.N. Oxidation stabilization of boiling steel.-Stal.-№6.- 2000.- P. 28-30.
47. T. Lipiński, A. Wach. Size of Non-Metallic Inclusions in High-Grade Medium Carbon Steel. Archives of foundry engineering volume 14, issue 4/2014, 55-60
48. Dekkers R., Blanpain B., Wollants P. et al. Non-metallic inclusions in aluminum-killed steels// Ironmaking and Steelmaking.- 2002.-Vol. 29.- No. 6.-R. 437.
49. Yoon B.-H., Heo K.-H., Kim J.-S., Sohn H.-S. Improvement of steel cleanliness by controlling slag composition// Ironmaking and Steelmaking.- 2002.- Vol. 29.-No. 3.-R. 215 - 218.
50. Kamkina L.V. The influence of technological factors on the formation of non-metallic inclusions in carbon steel and technological recommendations for reducing their number./Kamkina L.V., Bezshkurenko O.G., Sokur Yu.I., Nadchii A.A., Manidin V.S. // Modern problems of metallurgy. – 2014. - No. 17, P. 106-115.
51. Kiessling R., Lange N. Non-metallic inclusions in steel.-M.: Metallurgy, 1968.-124 p.
52. Gubenko S.I. Transformation of non-metallic inclusions in steel.-M.: Metallurgy, 1991.-225p.
53. Yavoiskii V.I., Rubenchyk Yu.I., Olenko A.P. Non-metallic inclusions and properties of steel. M.: Metallurgy, 1980. - 176 p.
54. E. Elsmar, K. H. Knapp, D. Ameling, etc. Slag and oxide inclusions in continuous casting of steels//Black Metals.- 1977 - No. 23.-S. 17-22.
55. Oxygen probes in steelmaking/Luzgin V.P., Zinkovsky I.V., Pokydyshev V.V., Ivanov A.A.-M.: Metallurgy, 1989 (Problems of steelmaking). - 144p.
56. Pires J.C.S., Garcia A. Modification of oxide inclusions present in aluminum-killed low-carbon steel by addition of calcium //pires@fem.unicamp.br
57. Hauk F., Petschke Yu. Wear of immersion cups and the formation of deposited alumina during continuous casting of steel // Refractories for MNLZ: conf. - M.: Metallurgy, 1986. - P.62-75.
58. Sarychev A.V., Nikolaev O.A. and others. Experience in preparing metal for pouring at graded MNLZ // Stal. -2007. - #2. - P.44-45.
59. A.N. Smirnov, A.V. Kravchenko, A.P. Verzilov. Improvement of modeling methods and optimization of parameters of steel dosing systems in crystallization
60. Preventions of Nozzle During Clogging the Continuous Casting of Al-Killed Steel / V.Yes, C.Bert, B.Bsr et al. // Steelmaking Conference Proceedings. - 2000. - P. 175-181.
61. Dyudkin D. A. Peculiarities of the complex effect of calcium on the properties of liquid and solid steel // Stal. - 1999. - No. 1. - P. 20-25.
62. Dyson D. J., Rose A. J., Whitwood M. M., Wilcox D. P. Studies in development of clean steels. Part 2: Use of chemical analysis//Ironmaking & Steelmaking.- 1998.-v. 25.-No. 4.-R. 279-286.