

Голуб І.В., Біла О.В., Носко О.А., Ковзік А.М.

Дослідження поведінки азоту при обробці металу

Holub I.V., Bila O.V., Nosko O.A., Kovzik A.M.

Study of nitrogen behavior during metal processing

Мета. Вивчення поведінки азоту при обробці металу газовою сумішшю та при розкисленні металу, тому що одним з найбільш поширених способів обробки сталі в ківші є процеси розкислення металу, продування металу інертними газами та вакуумування сталі.

Методика. Термодинамічні та кінетичні розрахунки, математична модель, що дозволяє розраховувати кількісні показники при розкисленні металу та при видаленні розчинених газів з металу при позапічній обробці та аналізувати процеси, які досліджуються.

Результати. При продуванні аргонем металу на установці ківш-піч його поверхня повинна бути відкритою від шлаку, але при цьому відбувається паралельний перехід газу з атмосфери в метал, оскільки шлак є захисним покривом металу від атмосфери. Також доказано, що спінювання шлаку впливає лише на вміст азоту в металі та дозволяє знизити його концентрацію на 0,001 %. Також доказано що азот не є причиною виникнення макродфектів в металевій заготовці. З'ясовано вплив азоту, алюмінію та титану на утворення нітридів в металі, який попередньо оброблявся газовою сумішшю, яка у своєму складі вміщувала азот.

Наукова новизна. Розгляд термодинамічних та кінетичних особливостей розчинення азоту в металі при розкисленні, продувці газами металу в ківшу дозволили з'ясувати тепло та масообмінні процеси поведінки азоту у металі, що буде сприяти перспективі розробки нової технології ковшової обробки металу.

Практична значущість. Можливість використовувати суміш газів, що містить азот, при продувці сталей більш широкого асортименту з урахуванням поведінки азоту при розкисленні металу, який може мати підвищений вміст розчиненого азоту. За допомогою достатніх кількостей присадженого титану можливо нейтралізувати дію азоту в сталях, що містять алюміній, і тим самим сприяти усуненню дефектів та покращенню якості литої заготовки також за рахунок ведення процесу обробки металу під спіненням шлаком.

Ключові слова: метал, позапічна обробка металу, газова суміш, азот, аргон, алюміній, титан.

Goal. Studying the behavior of nitrogen during metal treatment with a gas mixture and during metal deoxidation, because one of the most common methods of steel processing in a ladle is the process of metal deoxidation, blowing of metal with inert gases, and vacuuming of steel.

Method. Thermodynamic and kinetic calculations, a mathematical model that allows you to calculate quantitative indicators during deoxidation of metal and during the removal of dissolved gases from metal during out-of-furnace processing and to analyze the processes under investigation.

The results. When blowing metal with argon on a ladle-furnace installation, the surface of the metal must be open from slag, but at the same time there is a parallel transition of gas from the atmosphere to the metal, since the slag is a protective coating of the metal from the atmosphere, it has also been proven that the foaming of the slag affects only the nitrogen content in the metal and allows reducing its concentration by 0.001%, it is also proven that nitrogen is not the cause of macrodefects in the metal workpiece. The influence of nitrogen, aluminum, and titanium on the formation of nitrides in a metal previously treated with a gas mixture containing nitrogen was determined.

Scientific novelty. Consideration of the thermodynamic and kinetic features of the dissolution of nitrogen in metal during deoxidation, gas blowing of metal into the ladle made it possible to find out the heat and mass transfer processes of the behavior of nitrogen in the metal, which will contribute and possibly lead to the development of a new technology of ladle metal processing.

Practical significance. Use a mixture of gases containing nitrogen when blowing a wider range of steels, taking into account the behavior of nitrogen during the deoxidation of metal, which may have an increased content of dissolved nitrogen with the help of sufficient amounts of implanted titanium, it is possible to neutralize the effect of nitrogen in steels containing aluminum, and thereby contribute elimination of defects and improvement of the quality of the cast billet also due to conducting the metal processing process under foamed slag.

Key words: metal, gas mixture, nitrogen, metal processing, argon, aluminum, titanium.

Вступ. Отримання якісного металу в сталеплавильних агрегатах обмежується можливостями регулювання фізико-хімічних умов протікання основних реакцій, що викликає необхідність розробки процесів позапічної обробки сталі є актуальним напрямом досліджень. Однак перед металургіями України стоїть нелегке завдання – ресурсозбереження, і при цьому покращення якості продукції, що випускається. При виробництві кисню та аргону в кисневих цехах попутно отримують великі кількості азоту, який за собівартістю

вчетверо дешевше за аргон. Заміна частини аргону азотом дозволить суттєво знизити собівартість сталі. Робота присвячена розробці складу газової суміші, що подається на ківш-піч при позапічній обробці сталей різного асортименту з подальшим розливом на МНЛЗ. Для металургійних підприємств України актуальним завданням є розробка технології ковшової обробки металу, а саме для металів після його виплавки в дуговій

© Голуб І. В. – к.т.н., доц. УДУНТ
Біла О.В. – к.т.н., доц. УДУНТ
Носко О.А. – к.т.н., доц. УДУНТ
Ковзік А.М. – к.т.н., доц. УДУНТ

© Holub I. – c.t.s., docent USUST
Bila O. – c.t.s., docent USUST
Nosko O. – c.t.s., docent USUST
Kovzik A. – c.t.s., docent USUST



This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

сталеплавильній печі яка дозволить знизити собівартість сталі та не змінити її якісних показників. Також відомо, що для отримання низького показника азоту в металі необхідно забезпечити його низький рівень у полупродукті та захистити поверхню рідкого металу від атмосфери при випуску з печі, позапічній обробці та розливанні. Використання суміші з підвищеним вмістом азоту та контроль розкислювачів дозволить знизити собівартість ковшової обробки низьковуглецевих сталей та сталей з підвищеним вмістом азоту не змінюючи їх механічних властивостей.

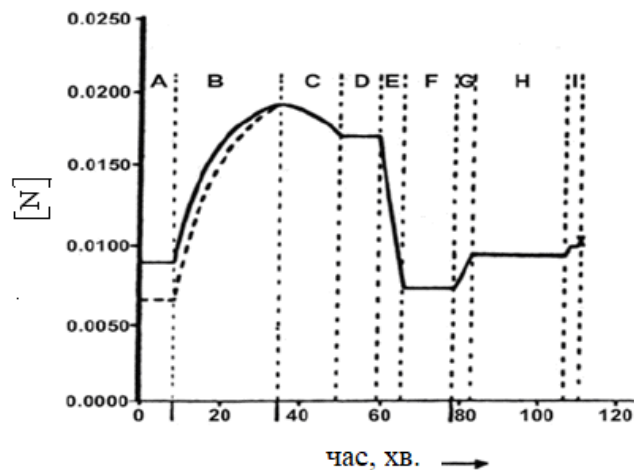
Аналіз літературних даних та постановка проблеми.

При аналізі кількості азоту в сталі з'ясовано, що майже при всіх способах виробництва сталей концентрація азоту в готовому металі коливається в межах 0,002 – 0,008 %. Вуглецеві сталі в яких вміст марганцю до 0,7 % та кремнію до 0,3 % вміст азоту знаходиться у межах 0,002-0,005%. Більш високі концентрації азоту спостерігаються в сталях, легованих хромом, ванадієм, алюмінієм або титаном. У високолегованих сталях концентрація азоту іноді піднімається до

0,018 - 0,025 %. При цьому з даних різних авторів [1-5] відомо, що концентрація азоту при температурі 1600 °С знаходиться в вузьких межах змін і дорівнює біля 0,044%.

Джерелами азоту при виробництві стали служать шихтові матеріали (скрап, чавун, металобрухт), атмосфера плавильного агрегату та продувка металу газами (технічний кисень або повітря), які подаються на поверхню або вглиб металу, а також розкислювачі, феросплави та навколишня атмосфера при випуску та розливанні рідкого металу.

В дослідженнях авторів [6] показані зміни вмісту азоту в сталі при виплавці, обробці та розливанні сталі (рисунок 1). У процесі плавки використано 50% оборотного лому та 50% скрапу (суцільна лінія) та 100% скрапу -пунктирна. Періоди, коли вміст азоту зменшується це стадії С та Е, бо на стадії С формується шлак, який запобігає адсорбції азоту, а на стадії Е бульбашки СО видаляють азот у атмосферу. Таким чином, вміст азоту в сталі залежить від вмісту вуглецю та кисню в сталі та інтенсивності реакції зневуглецювання.



Стадії сталеплавильного процесу:

- A - занурення електродів у холодну шихту;
- B - формування невеликих порцій рідкого металу та їх зростання;
- C - плавлення метало шихти, що залишилася;
- D - нагрів ванни до вуглецевого кипіння;
- E - період вуглецевого кипіння;
- F - присадка феросплавів та доведення ванни до температури випуску;
- G - випуск плавки;
- H - рідка сталь у сталерозливному ківші;
- I - рідка сталь у ПК та розливання

Рисунок 1. Зміни вмісту азоту при плавленні металу в ДСП, обробці та розливанні металу.

Для зниження вмісту азоту в металі слід використовувати шихтові матеріали з низьким вмістом азоту. Для запобігання адсорбції азоту при плавці в дуговій сталеплавильній печі рекомендують використовувати спінювання шлаку [7, 8], герметизацію печі та газу з низьким вмістом азоту. Для видалення азоту зі сталі можливо робити кипіння ванни за рахунок бульбашок СО (зневуглецювання та вакуумування).

Щодо надходження азоту з пічної атмосфери, думки різних авторів різняться. У автора [9] існує твердження, що в умовах окисної атмосфери сталеплавильних печей азот практично не може переходити в розплавлений метал через оксидну плівку яка утворюється в процесі плавлення металу. Також є твердження, що шлаки або окислювальні плівки не можуть повністю ізолювати метал із-за декількох факторів [10]. Автори

[11,12] стверджують що умови для видалення азоту існують при киснево-конверторному процесі та при вакуумуванні у VOD- і RH-агрегатах. На всіх інших технологічних етапах виробництва сталі відбувається тільки поглинання азоту металом.

Позапічна обробка сталі займає особливе місце при виробництві металу - від моменту випуску рідкого металу у ківш до моменту його затвердіння. В залежності від вимог до якості стали завданнями позапічної обробки є: десульфуратія, розкислення, легування, доведення до рекомендованої температури розливу, зниження вмісту розчинених газів (водень, азот), зневуглецювання, підвищення чистоти металу за показниками неметалевих включень, дефосфорація, розподіл металевих та шлакових фаз.

Схема основних методів позапічної обробки ділиться на дві групи:

- методи, що проводяться при атмосферному тиску (ківш-піч);
- методи, які протікають під тиском (вакууматор).

Перенесення частини металургійних операцій у ківш-піч дозволяє підвищити продуктивність основного плавильного агрегату, зменшити температуру випуску металу та підвищити якість продукції [13].

Продування сталі в ківшах інертними або нейтральними газами стало обов'язковим елементом технології виплавки сталі. Дегазація при продуванні інертними газами ґрунтується на різниці парціального тиску водню, азоту і оксиду вуглецю в бульбашці інертного газу, що утворюється, і в розчинених газах в металі. 95% всієї сталі, що виплавляється, обробляється аргоном. При цьому загальні витрати на продування металу при позапічній обробці 1 тони сталі становлять 0,2 - 0,3 доларів США за вартості металу в злитках 200 - 500 доларів США за тонну [14].

Для металургійних підприємств актуальним завданням є розробка технології ковшової обробки металу із застосуванням інертних продувних газових сумішей, що дозволяють знизити собівартість металу та отримати якісну сталь. Використання суміші з підвищеним вмістом азоту дозволяє здешевити ковшову обробку сталей різного сортаменту: низьковуглецевих та сталей з підвищеним вмістом азоту [15].

У більшості випадків азот надає негативний вплив на властивості сталі. При розчиненні азоту в розплавах заліза сталь стає схильною до старіння, то б то зниження пластичних властивостей з часом, особливо це проявляється у сталях, що працюють за підвищених температур. Проте, існує цілий клас сталей, у яких азот виступає легуючим елементом. Однак, багато дослідників і металургів вважають неприпустимим збільшення концентрації азоту при виробництві широкого класу сталей. У деяких літературних джерелах [16] є дані про продувку низьковуглецевого металу азотом при ковшової обробці. Але також слід враховувати, що у вирішенні проблеми підвищення корозійної стійкості сталі, яка відбувається при тенденції до зниження концентрації вуглецю та відмови від застосування добавок (таких, як титан), а також зниження вмісту вуглецю в сталях аустенітного класу призводить до значного зниження рівня їх міцності. У зв'язку з цим доцільно розглянути можливості контролю вмісту азоту в сталі та його поєднання з такими елементами, як алюміній, титан, ванадій, ніобій та інші або їх комбінації [17].

Матеріали та методи дослідження. Детальний розгляд термодинамічних та кінетичних особливостей розчинення азоту в металі дозволили з'ясувати тепло- та масообмінні процеси поведінки газів у металі при продувці інертними газами ме-

талу в ківші та при вакуумуванні. Математична модель видалення розчинених газів з металу при позапічній обробці дозволяє проаналізувати поведінку газів у металі при створенні суміш газів, яка містить азот для продувки різних марок сталі з можливістю проведення подальшого аналізу поведінки азоту при безперервному литті заготовок та розрахувати кількість елементів які використовуються при розкисленні для отримання якісної структури заготовки с задовільними механічними властивостями.

В основі математичної моделі знаходяться рівняння видалення розчиненого кисню, водню та азоту

$$[C] + [O] = \{CO\}, \quad (1)$$

$$[H] = \frac{1}{2} H_2. \quad (2)$$

$$[N] = \frac{1}{2} N_2. \quad (3)$$

Концентрації азоту, водню та кисню, рівноважні з парціальним тиском N_2 , H_2 та CO у бульбашці

$$[N]_r = K_N \sqrt{P_{N_2}}, \quad (4)$$

$$[H]_r = K_H \sqrt{P_{H_2}}, \quad (5)$$

$$[O]_r = P_{CO} / ([C]K_C), \quad (6)$$

де K_N , K_H и K_C – константи рівноваги реакцій розчинення азоту, водню та окислення вуглецю.

Характер процесів масообміну між розчиненими у металі газами ($[H]$, $[N]$, $[O]$) та бульбашками газів, що барботують, визначається ходом системи до рівноваги та описано виразом

$$m_r = \int_0^{\tau} (\beta_r ([G] - [G]_r) \cdot S_r \cdot d\tau, \quad (7)$$

де β_r – коефіцієнт масовіддачі між металом та бульбашкою, $[G]$ та $[G]_r$ – концентрація газу в металі та рівноважна з бульбашкою, S – площа поверхні розділу газ-метал, τ - час піднімання газової бульбашки.

При розрахунках рівноваги у системі метал-бульбашка з урахуванням декількох газів використовувано вираз

$$P_i = \frac{(m_i/M_i)P}{(m_1/M_1 + m_2/M_2 + \dots + m_i/M_i)}, \quad (8)$$

де m_1 , m_2 , ... m_i – маси газів в газовій суміші, M_1 , M_2 , ... M_i – молекулярні маси цих газів, P – тиск під, яким знаходиться газова суміш.

Розроблений алгоритм дає можливість прогнозувати отримання якісної безперервнолитої заготовки для сталей різного призначення.

Для аналізу появи нітридів використувано вирази змінення вільної енергії та константи рівноваги та також рівняння авторів [18].

Мета і завдання дослідження. Одним з найбільш поширених способів ковшової обробки сталі є продування металу інертними газами та її вакуумування. При цьому відбувається видален-

ня розчинених у металі газів – кисню, водню та частково азоту. Видалення розчиненого кисню здійснюється за рахунок протікання реакції зневуглицьовування. Водню та азоту – за рахунок виділення його у вигляді молекул, що утворюють бульбашки газу. Процес масообміну в металі відбувається на межі розділу метал-бульбашка. Заміна частини аргону азотом у газі який використовують для продувки металу призведе до перерозподілу величин і напрямку потоків азоту з металу в бульбашці газу, яким продувають метал чи в процесі вакуумування. Тому метою та завданням роботи є проаналізувати скільки відсотків аргону можливо замінювати на азот для сталей різного сортаменту при ковшовій обробці а також

виявити вплив азоту на структуру заготовки та нітридоутворення, і вплив нітридоутворюючих елементів на механічні властивості сталі.

Результати дослідження. Встановлено, що за відсутності азоту в газі яким продувають метал, потік азоту постійно спрямований до газової бульбашки. Це пов'язано з високим тиском стовпу металу, що підвищує парціальний тиск азоту у бульбашках газу, яким здійснюють продувку.

На рисунку 2 наведено зміну вмісту азоту в металі за різних його витрат у продувочному газі. При переході від продування чистим аргоном до чистого азоту відносне зниження азоту в сталі підвищується приблизно на 20 %.

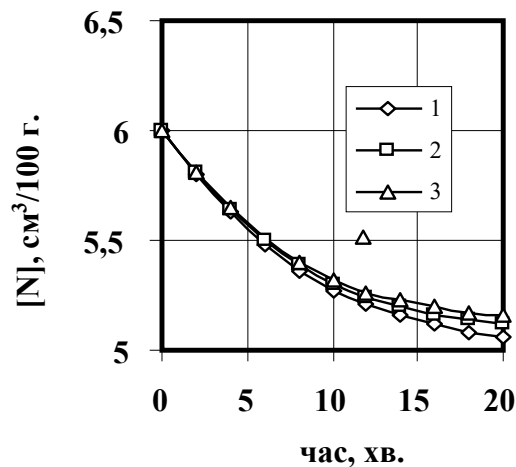


Рисунок 2. Вплив азоту під час продування на зміну вмісту азоту в металі; витрата азоту, м³/хв.: 1 – 0; 2 – 0,2; 3 – 0,4 (сумарна витрата газів 0,4 м³/хв.).

Таке невисоке зниження азоту в сталі пов'язане з тим, що істотна частка азоту видаляється з бульбашками CO і через поверхню металу. Частка видалення азоту з бульбашками CO на початку процесу сягає 90% та поступово знижується до 40%. За рахунок цього, відповідно, зростає частка видалення через поверхню металу. Частка ви-

далення азоту з бульбашками аргону невелика і складає близько 2 – 3 %.

При подальших дослідженнях встановлено у яких долях розподіляється азот між бульбашками CO, аргону та поверхнею металу. На рисунку 3 наведено розподіл азоту з газу, яким продувають метал, по статтям за відносно малих його витрат (близько 25% у газовій суміші).

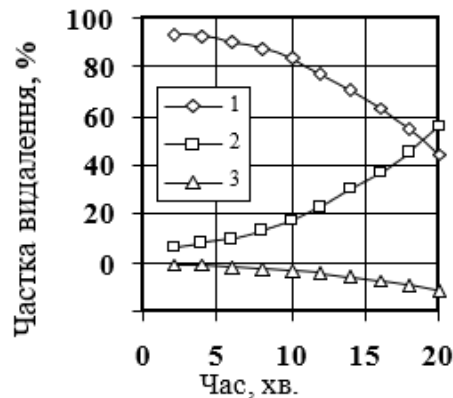


Рисунок 3. Баланс азоту, (%), при використанні суміші азоту (0,1 м³/хв) та аргону (0,3 м³/хв): 1 – видалення в бульбашку CO; 2 – видалення крізь поверхню металу; 3 – надходження до металу.

З'ясовано, що в загальному балансі до кінця процесу близько 10% азоту надходить в метал, але близько 40% видаляється з бульбашками CO і близько 50% видаляється через поверхню. З підвищенням вмісту азоту в газі яким продувають метал до 50%, частка азоту, що надходить у метал, зростає до 20%. З подальшим збільшенням частки азоту в газі яким продувають метал з 75 до 100%, частка азоту, що надходить в метал, зростає відповідно до 40% і 60%. Отже, заміна аргону азотом у газі яким продувають метал призводить до перерозподілу величин і напряму потоків азоту з металу в бульбашки газу. Частка азоту, що надходить з газу, яким продувають, до металу, при цьому зростає, але перехід азоту з металу в бульбашки CO і через поверхню залишається достатнім, щоб забезпечити загальне зниження концентрації азоту в металі. Тобто, заміна частини аргону азотом у газі, яким продувають метал не повинна суттєво змінити нерівно-

вагу реакцій видалення газів з металу, крім реакції видалення азоту, оскільки реакції видалення газів (крім азоту) принципово не змінюються.

Також проаналізовано вплив різних співвідношень аргону та азоту у газовій суміші якою продувають метал. Заміна частини аргону азотом у газі, яким продувають метал призводить до перерозподілу величин і напряму потоків азоту з металу в бульбашки газу, яким продувають метал. Частка азоту, що надходить з продувального газу в метал, при цьому зростає, але перехід азоту з металу в бульбашки CO і через поверхню залишається достатнім, щоб забезпечити загальне зниження концентрації азоту в металі (рисунк 4). Згідно розрахунку співвідношення азоту і аргону 1 ÷ 3 в суміші газів, яка використовується для продувки сталей не призведе до змін поведінки газів, які знаходяться у металі.

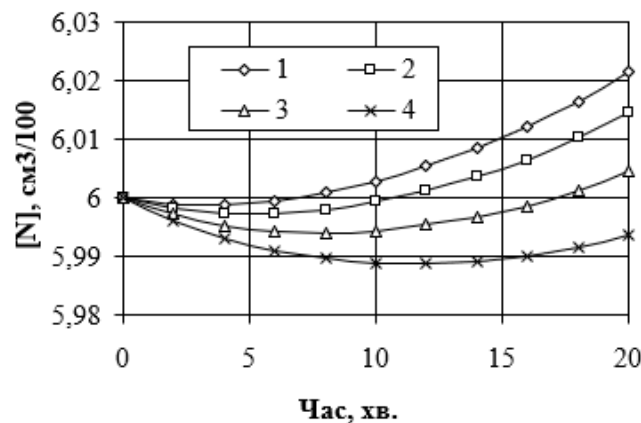


Рисунок 4. Зміна концентрації азоту в металі при різних співвідношеннях аргону і азоту в суміші, якою продувають метал: 1- аргону 0, азоту 0,1; 2 - аргону 0,2, азоту 0,2; 3 - аргону 0,25, азоту 0,15; 4 - аргону 0,3, азоту 0,1 м³/хв.

При впровадженні запропонованого способу, використання азоту у якості інертного газу яким продувають метал, слід враховувати вибір марок сталі по відношенню впливу азоту на якість металу, пов'язане з появою додаткової кількості нітрідів.

Тож були проведені дослідження направлені на аналіз та з'ясування шляхів уникнення утворення нітриду алюмінію при використанні його у якості розкислювача у металах які продувалися сумішшю газів з підвищеним вмістом азоту, тому що утворення нітриду алюмінію впливає на макроструктуру заготовки та механічні властивості сталі [19].

Досліджували сталь 1008 ASTM, хімічний склад якої після виплавки в ДСП та ковшовій обробки на УКП наступний: C = 0.05 %, Mn = 0.35 %, Cu = 0.20 %, Si = 0.011 %, Ni = 0.12 %, P = 0.02 %, S = 0.014 %, Cr = 0.056 %, N = 0.015 % та інші. У метал вводили алюміній після печі у ківш та на УКП у вигляді SiAl. Питома витрата алюмінію на

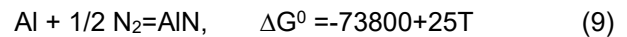
тону металу склала 1,65 кг. Час обробки металу на УКП склав одну годину. Середня температура металу на УКП дорівнювала 1590 °C. Розливу металу проводили без захисту струменя при температурі 1550 °C. Переріз заготовки 125x125 мм.

Проведений аналіз на утворення макроструктурного дефекту за рахунок виділення газової фази при затвердінні заготовки показав неможливість цього процесу, так як при даних умовах максимальний парціальний тиск для існування бульбашки складає біля 19500 Па, а парціальний тиск над металом біля 80000 Па. При такому співвідношенні тисків існує тільки одна можливість це перехід азоту з атмосфери в рідкий розплав у процесі розливання металу, але для переходу азоту з атмосфери до металу необхідна дисоціація молекул азоту на атоми, яка можлива тільки за умови, що температура буде вище 2000 °C. Розливання металу відбувається при 1550 °C тому такий перехід азоту з атмосфери

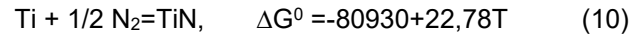
неможливий. Також треба враховувати, що розливання здійснювалося без захисту струменя, але з зануренням розливного стакану під захисним шлаком ці фактори знижують до мінімуму ймовірність переходу азоту в метал.

У роботах [20, 21] авторами відмічалось, що випадання нітридної фази при $p_n = 1 \text{ атм}$ та $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ спостерігається при концентраціях титану – 0,29 %, алюмінію – 0,82%, цирконію – 0,093%. Для визначення умов нітридної фази достатньо скористуватися рівнянням, що зв'язує температуру, p_n і концентрацію легуючого елемента [X]. Авторами [22] відмічалось, що присадка титану значно знижує вміст азоту в сталі за рахунок утворення нітриду титану, які переходять у шлак.

Реакція утворення нітриду алюмінію супроводжується наступною зміною вільної енергії:



Реакція утворення нітриду титану супроводжується наступною зміною вільної енергії:



Титан при температурі $1550\text{-}1600 \text{ }^\circ\text{C}$ має значно більшу спорідненість до азоту, ніж алюміній. На рисунку пунктирною стрічкою, показано, що при вмісті в рідкому залізі $0,0015\text{-}0,002 \text{ } \%$ титану забезпечується такий рівноважний вміст азоту, при якому не повинно відбуватися утворення нітрідів алюмінію.

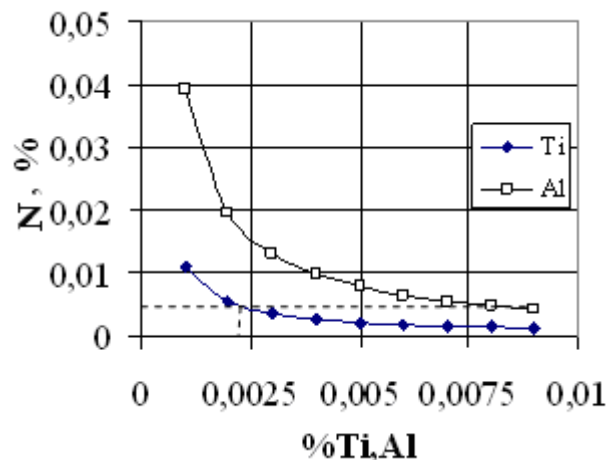


Рисунок 5. Рівноважні вмісти азоту та титану, азоту та алюмінію в металі при температурі $1550 \text{ }^\circ\text{C}$.

Аналіз утворення нітрідів у сталі 1008, заданого хімічного складу, показав що кількість титану, спорідненість до азоту у якого вища за спорідненість азоту до алюмінію, недостатня (в два рази менше) для нейтралізації утворення нітриду алюмінію (рисунки 5). Тому отримана металева заготовка має макроструктурні дефекти, а також незадовільні механічні властивості.

Обговорення результатів. При аналізі заміни аргону на суміш (аргон+азот) відбувається насичення металу азотом, яке залежить від складу та кількості шлаку при обробці металу на УКП. Виявлено, що основне видалення азоту з металу відбувається при інтенсивному процесі зневуглецювання в бульбашку CO. Тому чим довше відбувається процес зневуглецювання, тим більше азоту залишить метал, але при виробництві сталей необхідно дотримуватися марочного вмісту вуглецю та азоту.

Таким чином, використовувати суміш, що містить азот, можливо за рахунок ведення процесу обробки металу під спіненим шлаком на установці ківш-піч для отримання більш широкого класу сталей з низьким вмістом вуглецю. Спінений шлак представляє сукупність бульбашок монооксиду та діоксиду вуглецю, розділених тонкими прошарками шлаку. Розмір бульбашок, що ста-

новлять дисперсну фазу, лежить в межах від часток до кількох сантиметрів. Утворення та стійкість спіненого шлаку залежить від його фізико-хімічних властивостей (в'язкість, поверхневий натяг, температура), інтенсивності, місця газовиділення та розподілу газових бульбашок за розмірами. Спінювання шлаку впливає лише на вміст азоту в металі [23]. Добре спінювання призводить до зниження вмісту азоту на $10\text{-}20 \text{ ppm}$ до рівня близько 30 ppm за рахунок інтенсивнішого процесу зневуглецювання і за рахунок захисту поверхні металу від атмосфери. Але треба враховувати і відоме негативне явище спінюваності шлаку - викиди шлаку з ківшу.

Вивчення впливу шлакового покриву поверхні металу на видалення газів (водню та азоту) показало, що при використанні аргону у якості газу, яким продувають метал на установці ківш-піч, при зниженні інтенсивності процесу зневуглецювання для більш повного видалення газів поверхня металу повинна бути відкритою від шлаку. Але при цьому постійно відбуватиметься паралельний процес переходу газу з атмосфери в метал (переважно для азоту), оскільки шлак є захисним покривом металу від атмосфери.

Заміна частини аргону азотом в газі призводить до перерозподілу величин і напрямку потоків

азоту з металу в бульбашки газу, яким продувають метал. Щоб забезпечити загальне зниження концентрації азоту в металі також необхідно мати низький залишковий тиск над металом та відповідні вимоги щодо вмісту азоту в металі [24].

Беручи до уваги можливість утворення бульбашки, що складається з двох газів CO і N₂, розрахунками показано що значення тиску CO + N₂ склало близько 82000 Па, що менше 1 атм. Таким чином, при виплавці сталі 1008 не виявлено умов для утворення бульбашок при підвищеному вмісті азоту в металі на випуску. Проведені розрахунки та дослідження підтверджують висловлювання автора [10], що на відміну від водню азот практично ніколи не виділяється з металу в процесі кристалізації і ніколи не є причиною утворення бульбашок, пористості. Однак, підвищення вмісту алюмінію та азоту в сталі призводять до утворення специфічних макродефектів [22], що негативно впливають на пластичну деформацію металу і погіршують механічні властивості. Утворення нітриду алюмінію може відбуватися під час кристалізації сталевого зливка [22]. Алюміній та азот утворюють нітрид алюмінію AlN з температурою плавлення близько 2100 °С. Термодинамічний розрахунок показує, що за допомогою достатніх кількостей присадженого титану можливо нейтралізувати дію азоту в сталях, що містять алюміній, і тим самим сприяти усуненню дефектів

та покращенню якості литої заготовки. Також можливо використовувати суміш газів при вакуумуванні сталей бо доведено що вміст CO і водню в бульбашках продувального газу не залежить від співвідношення у ньому аргону і азоту [25].

Висновки. Використання спіненого шлаку при позапічній обробці металу на установці ківш-піч дозволить розширити асортимент сталей, що виплавляються з використанням у якості газу яким продувають метал - азот або його суміш з аргонном, при цьому значно знизиться собівартість одержуваного продукту і не змінять властивості металу. Використання моделі дозволить розширити сортамент сталей до яких можливо застосовувати у якості продувального газу азот чи використовувати у якості інертного газу суміш газів аргону та азоту у різному співвідношенні при обробці сталі.

При розкисленні та легуванні сталей алюмінієм позапічна обробка яких здійснюється газовою сумішшю необхідно враховувати вплив на утворення нітридів таких елементів як титан та цирконій бо вони можуть надходити в метал з шихтою і можуть позитивно впливати на механічні показники якості через те що спорідненість до кисню в них невелика, у порівнянні з алюмінієм та титаном, а з азотом вища чим у алюмінію та титану.

Перелік посилань

1. Чуран Г. М., Свяжин А. Г., Вишкарєв А. Ф., Явойский В. Н. Растворимость азота в жидком железе // *Металл.* – 1970. – С. 51-57.
2. Свяжин А.Г. Исследование некоторых физико-химических свойств жидкого железа и сплавов железо углерод с применением безтигельной плавки // *Теория и технология новых процессов в производстве стали.* – 1968. – С. 5 -24.
3. Schwerdtfeger K. Diffusion of Oxygen and Nitrogen in Liquid Iron // *Trans. Met. Soc. AIME*, 1967. -Vol. 239. - №2 - p. 134.
4. Schenck H., Steinmetz E. Chemische Aktivitäten von Bor und Stickstoff im flüssigen Bereich des System Eisen – Bor – Stickstoff // *Arch. Eisenhutlenwese.* - 39. - 1968. - P. 255.
5. Gomersall D. W., Ward R.G. The Solubility of Nitrogen in Liquid Iron – Carbon Alloys // *Trans. Met. Soc. AIME.* - 1968. - vol. 242. - P. 1309.
6. Pilliod C. F. Variables Affecting the Nitrogen Content of Carbon and Low Alloy Acid Electric Arc Furnace Steels, 46th Electric Furnace Conference Proceedings // *Pittsburgh (USA): The Iron and Steel Society*, 1988. - P. 107-110.
7. Меджибожский М. Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. – Киев - Донецк: Вища школа. Головное издательство, 1986.- 280с.
8. Лопухов Г. А. Вспенивание шлака при плавке стали в дуговых печах. Фундаментальные исследования физико-химия металлургических расплавов / Г.А. Лопухов // М.: ІЦК «Академкнига», 2002. - 469с.
9. Морозов А.Н. Современный мартеновский процесс. – Свердловск: Издательство литературы по чёрной и цветной металлургии, 1961. - 600 с.
10. Явойский В.И. Теория процессов производства стали. - М.: Гос –науч-тех. изд. материалов по чёрной и цветной металлургии, 1963. - 817 с.
11. Свяжин А.Г., Киндоп В.Э., Романович Д.А. и др. Технология производства стали с низким содержанием азота // *Труды 6 конгресса сталеплавильщиков.* М.: Черметинформация, 2002. - С. 71 - 77.
12. Киндоп В.Э., Свяжин А.Г. Математическая модель поведения азота при кислородно-конвертерном процессе // *Труды 6 конгресса сталеплавильщиков.* М.: Черметинформация, 2002.- С.66-71.
13. Розвиток сектора чорної металургії в Україні. Аналітичний огляд. -Київ: Міленіум, 2004. - 110 с.
14. Г.Г. Ефименко, В.Н. Нецадим, М.И. Цымбал, Т.Н. Павлышин и др. Анализ развития и технико-экономические проблемы прогресса производства стали в мире. – Днепропетровск: ДМетИ, 1993. -227с.
15. Яковлев Ю.Н., Голуб И.В. Особенности поведения азота при его использовании в качестве продувочного газа // *II International Conference "Strategy of Quality in Industry and Education".* – Varna. (Bulgaria). -2006. - V.2. - P. 144-147.
16. Величко А.Г. Теория и практика внепечной обработки металла. Учебн. Пособие. – Днепропетровск: ГМетАУ,1998. – 103с.

17. Камкіна Л.В., Мішалкін А.П., Камкін В.Ю., Грищенко Ю.М., Ісаєва Л.Є. Зменшення шкідливого впливу азоту на властивості низьковуглецевої сталі 08Ю шляхом підбору раціональної кількості нітридоутворюючих елементів/ Теорія і практика металургії, Дніпро, 2019, №6, с. 17-24. (<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2019.03>)
18. Помарин Ю. М., Григоренко Г. М. Уравнение для расчёта растворимости азота в бинарных и многокомпонентных сплавах железа. //Тезисы докладов. Республиканская научно-техническая конференция. Днепропетровск. - 1987. – С. 31 - 32.
19. Фазові перетворення в спеціальних легованих сталях. Навчальний посібник / Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2007. – 132 с
20. Carney D. J. Gases in Metals // Amtr. Sos. for Met., Cleveland, Ohio, 1952. - P 24-27.
21. Григорян В.А., Белянчиков Л.Я., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. - М.: Металлургия, 1987. - 272 с.
22. Гуревич Ю.Г. Нейтрализация влияния азота на качество сталей. // Металлургия стали. Сборник статей. Т 2. Изд. Сибирского металлургического института. - 1958. - С. 31-35.
23. Курагин С.В., Шкирмотов А.П. Эффективность обработки жидкой стали за рубежом./ Ин-т Черметинформация. – М., 1990.
24. Камкіна Л. В., Проїдак Ю. С., Стовпченко А.П., Голуб І. В. Совершенствование процессов дегазации стали при внепечной обработке / Л. В. Камкіна, Ю. С. Проїдак, А.П.Стовпченко, І. В. Голуб // XV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Produkcja i zarządzanie w hutnictwie" Zakopane 27-30.06 2007 czesc 1 pp. 107-111
25. Яковлев Ю.Н., Голуб И.В. Исследование на математической модели удаление газов из стали при вакуумировании с продувкой металла газовыми смесями /Ю.Н. Яковлев, И.В. Голуб/ ПДТУ Весник №15, Мариуполь, 2005, с.37-40.

References

1. Churan, G. M., Svyazhin, A. G., Vishkarev, A. F., & Yavoyskiy, V. N. (1970). Solubility of nitrogen in liquid iron. *Metall*, 51-57
2. Svyazhin, A. G. (1968). Study of some physicochemical properties of liquid iron and iron-carbon alloys using crucibleless melting. *Theory and technology of new processes in steel production*, 5 -24
3. Schwerdtfeger, K. (1967). Diffusion of Oxygen and Nitrogen in Liquid Iron. *Trans. Met. Soc. AIME*, 239(2), 134
4. Schenck, H., & Steinmetz, E. (1968). Chemische Aktivitäten von Bor und Stickstoff im flüssigen Bereich des System Eisen – Bor – Stickstoff. *Arch. Eisenhuttenwese*, 39, 255
5. Gomersall, D. W., & Ward, R. G. (1968). The Solubility of Nitrogen in Liquid Iron – Carbon Alloys. *Trans. Met. Soc. AIME*, 242, 1309
6. Pilliod, C. F. (1988). Variables Affecting the Nitrogen Content of Carbon and Low Alloy Acid Electric Arc Furnace Steels, 46th Electric Furnace Conference Proceedings. *Pittsburgh (USA): The Iron and Steel Society*, 107-110
7. Medzhibozhsky, M. Ya. (1986). *Fundamentals of Thermodynamics and Kinetics of Steelmaking Processes*. Vishcha shkola. Main Publishing House
8. Lopukhov, G. A. (2002). *Foaming of Slag during Melting of Steel in Arc Furnaces. Fundamental Research on the Physicochemistry of Metallic Melts*. ITsK Akademya
9. Morozov, A. N. (1961). *Modern open-hearth process*. Publishing house of literature on ferrous and non-ferrous metallurgy
10. Yavoyskiy, V. I. (1963). *Theory of steel production processes*. State scientific and technical publication of materials on ferrous and non-ferrous metallurgy
11. Svyazhin, A. G., Kindop, V. E., Romanovich, D. A., et al. (2002). Technology of production of steel with low nitrogen content. *Proceedings of the 6th congress of steelmakers* (pp. 71-77). Chermetinformatiya
12. Kindop, V. E., Svyazhin, A. G. (2002). Mathematical model of nitrogen behavior in the oxygen-converter process. *Proceedings of the 6th congress of steelmakers* (pp. 66-71). Chermetinformatiya
13. *Development of the ferrous metallurgy sector in Ukraine. Analytical review*. (2004). Millenium
14. Efimenko, G. G., Neshchadim, V. N., Tsybmal, M. I., Pavlyshin, T. N., et al. (1993). *Analysis of development and technical and economic problems of progress in steel production in the world*. DMetI
15. Yakovlev, Yu. N., Golub, I. V. (2006). Features of nitrogen behavior when used as a purge gas. *II International Conference "Strategy of Quality in Industry and Education"*, Varna. (Bulgaria), vol. 2, 144-147
16. Velichko, A. G. (1998). *Theory and practice of out-of-furnace metal processing. Textbook*. GMetAU
17. Kamkina, L. V., Mishalkin, A. P., Kamkin, V. Yu., Grishchenko, Yu. M., & Isayeva, L. Ye. (2019). Replacement of the wasteful influx of nitrogen on the power of low-carbon steel 08 by the way of selecting a rational amount of nitride-containing elements. *Theory and practice of metallurgy*, 6, 17-24. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2019.03>
18. Pomarin, Yu. M., & Grigorenko, G. M. (1987). Equation for calculating the solubility of nitrogen in binary and multicomponent iron alloys. *Abstracts of reports. Republican scientific and technical conference*, 31 - 32.
19. Kutsova, V. Z., Kovzel, M. A., & Nosko, O. A. (2007). *Phase transformations in special alloy steels. Initial guide*. NMetAU
20. Carney, D. J. (1952). *Gases in Metals*. Amtr. Sos. for Met., Cleveland, Ohio. (pp. P 24-27).
21. Grigoryan, V. A., Belyanchikov, L. Ya., & Stomakhin, A. Ya. (1987). *Theoretical foundations of electric steelmaking processes*. Metallurgy
22. Gurevich, Yu. G. (1958). Neutralization of nitrogen influence on steel quality. *Metallurgy of steel. Collection of articles*. Vol. 2. (pp. 31-35). Publ. Siberian Metallurgical Institute
23. Kuragin, S. V., & Shkirmotov, A. P. (1990). *Efficiency of liquid steel processing abroad*. Institute of Chermetinformatiya

24. Kamkina, L. V., Proydak, Yu. S., Stovpchenko, A. P., & Holub, I. V. (2007). Improving steel degassing processes during out-of-furnace treatment. *XV Miedzynarodowa Science-Technical Conference "Production of metallurgy in hutnictwie"*, Zakopane, 27-30.06.2007. Czesc 1, pp. 107-111
25. Yakovlev, Yu. N., & Holub, I. V. (2005). Research on a mathematical model of gas removal from steel during vacuumization with blowing of metal with gas mixtures. *PDTU Bulletin*, 15, 37-40

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 04.09.2023
Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.11.2023