



PURGING OF THE CONVERTER BATH IN THE REFINING OF FERRONICKEL USING SINGLE-NOZZLE AND THREE-NOZZLE LANCES ПРОДУВАННЯ ВАННИ КОНВЕРТЕРА ПРИ РАФІНУВАННІ ФЕРОНІКЕЛЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОДНОСОПЛОВИХ ТА ТРИСОПЛОВИХ ФУРМ

Akreiev V. V. / Акресв В. В.

postgraduate / аспірант

ORCID: 0009-0009-3705-4129

Prykhodko S. V. / Приходько С. В.

postgraduate / аспірант

ORCID: 0009-0005-0013-2198

Melnyk S. O. / Мельник С. О.

postgraduate / аспірант

ORCID: 0009-0009-3964-312X

Ovcharuk A. M. / Овчарук А. М.

d.t.s., prof. / д.т.н., проф.

Institute of Industrial and Business Technologies, Dnipro, Gagarina avenue, 4, 49000

Інститут промислових та бізнес технологій, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4, 49600

Анотація. Заключною стадією процесу отримання феронікелю, одного з варіантів переробки окиснених нікелевих руд перед гранулюванням, є рафінування феронікелю. Технологічні схеми рафінування феронікелю на підприємствах в світі, в основному, містять схожі етапи виробництва з незначними варіаціями, але нерідко використовується процес у вертикальних кисневих конвертерах. Двоетапність (дуплексність) рафінування феронікелю полягає в тому, що побічний продукт плавки, що утворюються в початковий період обробки чорного феронікелю, містить багато оксиду кремнію, відповідно першу стадію рафінування проводять в конвертерах з кислим футеруванням. Другу стадію обробки, з видаленням залишків хрому, вуглецю, сірки, фосфору, та інших домішок, здійснюють в конвертерах з основним футеруванням. В цій статті мова йде про конвертори, які мають верхнє підведення кисню.

Отже процес продування киснем необхідний для зниження вмісту сірки, фосфору, вуглецю та заліза в металі FeNi до заданого рівня. Окислення домішок відбувається здебільшого у зоні циркуляції, де метал стикається з футеровкою, шлаком і присадками плавки. Візуальне спостереження, дослідження газового струменя, процесу циркуляції рідкого металу і шлаку всередині конвертера неможливе, тому що середовище непрозоре, а конвертер має металевий корпус і вогнетривке футерування. У цій доповіді буде проведено комп'ютерне моделювання гідродинамічного процесу продування конвертерної ванни із застосуванням односоплових та трисоплових фурм де сопла розташовані під різним кутом до вертикалі. Розглянуто способи збільшення ефективності та стабільності продування на прикладах моделювання об'ємної концентрації рідини, масової концентрації рідини та траєкторії руху газу в розплаві. Звернено увагу на питання стійкості футерування агрегату.

Ключові слова: рафінування феронікелю, конвертер, киснева фурма, односоплова фурма, трисоплова фурма, моделювання процесу продування, стійкість футерування агрегату.

Нікель та використання нікелю. Виробництво феронікелю на Побузькому феронікелевому комбінаті

Нікель — п'ятий за поширеністю елемент на Землі, який широко зустрічається в земній корі та ядрі, природним чином міститься в ґрунті та воді, є важливою поживною речовиною для рослин. Нікель має видатні фізичні та



хімічні властивості, що робить його присутність необхідною у сотнях тисяч продуктів, його найбільше використовують у легуванні, зокрема з хромом та іншими металами для виробництва нержавіючої та жаростійкої сталі:

- має високу температуру плавлення 1453 °С;
- стійкий до корозії та окислення;
- має високу пластичність, нікель ковкий;
- готовий до використання в сплавах;
- магнітний за кімнатної температури;
- може бути нанесений за допомогою гальванічного покриття;
- має каталітичні властивості;
- піддається повній переробці.

Таким чином майже 70% світового виробництва нікелю витрачається на виробництво нержавіючої сталі, 11% використовується в виробництві електроніки та акумуляторів, сплави кольорових металів - 7%, інші галузі, такі як леговані сталі та ливарне виробництво - 12% [1, 2].

Нікель зустрічається в природі, головним чином у вигляді оксидів, сульфідів і силікатів. Первинний нікель виробляють і використовують у вигляді феронікелю, оксидів нікелю та інших хімічних речовин, а також як чистий металевий нікель. Щорічно у світі виробляється та використовується понад два мільйони тонн нового або первинного нікелю. Існує багато різних нікелевих руд, які вимагають різноманітних методів видобутку нікелю. В даний час нікельвмісні руди видобувають більш ніж в 25 країнах світу, а ресурси нікелю оцінюються майже в 350 мільйонів тонн. Понад 50% світових ресурсів нікелю припадає на Австралію, Індонезію, ПАР, Росію та Канаду, економічні концентрації нікелю зустрічаються в родовищах сульфідних і латеритних руд [1].

Майже 80% усього історично видобутого нікелю було видобуто протягом останніх трьох десятиліть. Удосконалені технології видобутку, плавлення та рафінування, а також збільшені потужності дозволяють переробляти нікелеву руду з нижчим вмістом. Зниження вмісту руди не обов'язково є ознакою зменшення ресурсів, а є відображенням інновацій і вдосконалень, внесених у видобуток і технологічні процеси. Додатково слід зазначити, що значними вважаються поклади нікелю в морських глибинах. За останніми оцінками, у таких родовищах міститься понад 300 мільйонів тонн нікелю [1].

За оцінками закордонних експертів, підтверджені запаси нікелю в Україні становлять близько 190 тис. т (0,4% від світових). Рентабельні родовища силікатного нікелю виявлені в регіоні Середнє Побужжя (6 родовищ). В Побузській групі розробляються Деренюхське та Липовеньківське родовища, підготовлене до експлуатації Тарнаватське родовище. За вітчизняними даними, запаси нікелю в Середньому Побужжі становлять понад 60 тис. т. У районі Побузького ферронікелевого заводу виявлено кілька нових родовищ і перспективних ділянок із загальними перспективними ресурсами 52 тис. т. Здебільшого це руда з низьким вмістом нікелю [3].

Побузький феронікелевий комбінат - єдине в Україні підприємство, що виробляє в промисловому масштабі феронікель з бідних окислених



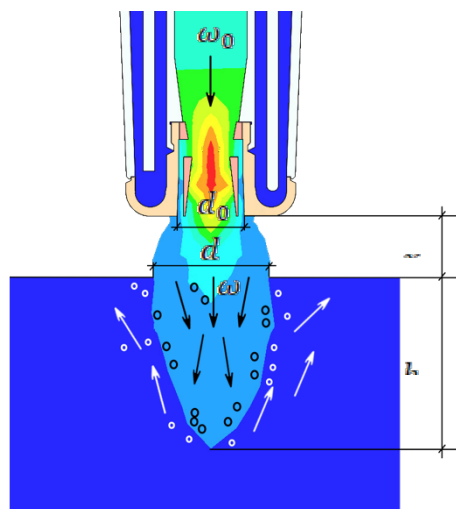
нікелевмісних руд. Технологія включає в себе попередню сушку всієї маси руди зі зниженням вологості з 30 – 35 % до 18 – 20 %, випал рудної шихти-суміші руди з відновником (АС, АШ), ведеться в трубчастих обертових печах діаметром 4,5 м і довжиною 70 м. Одержаний гарячий недогарок з температурою 800-900°C завантажується для відновлювальної плавки на чорновий феронікель у рудоплавильних електропечах потужністю 40 МВт з шістьма самоспікаючимися електродами діаметром 1200 мм. Температура чорнового металу на виході з РТП становить 1360-1480°C. Чорновий феронікель має наступний склад: Ni 10 – 30 %; Si 0,1 – 6,0 %; С 1,8 – 2,5%; S – не більше 0,4 %; Cr 0,5 – 2,0 %; P – не більше 0,1 %, Cu – не більше 0,08 %, решта — залізо.

Остаточне очищення від домішок, при отриманні товарного феронікелю, проводиться у вертикальних, 50 тонних конверторах з верхнім підводом кисню (кисень – власного виробництва), дуплекс-процесом, послідовно в двох конверторах. Товарний феронікель з вмістом нікелю близько 15-20 %, домішок менше 0,5 %, розливається в зливки, масою близько 35 кг або гранулюється [4].

Продування в конвертері зверху та циркуляція рідини

Режим дуття суттєво впливає на продуктивність конвертерів, хід шлакоутворення, стійкість футерування, кількість викидів, вихід рідкої сталі та стійкість сопла фурми. Характер взаємодії кисневого струменя з конвертерною ванною може змінюватись в залежності від конструкції сопла, тиску кисню, положення сопла над рівнем ванни та інших факторів [6].

Схема інжекції газового струменя зверху в рідину при великому тиску або швидкості струменя в гирлі сопла і при невеликій відстані x кінця сопла від рівня рідини представлена на мал. 1. Струмінь газу, виходячи із сопла, розширюється, залучаючи і речовину навколишнього газового середовища.



Мал. 1. Схема взаємодії струменя газу та рідини при продуванні зверху

При зустрічі з рідиною діаметр струменя d більший за діаметр сопла d_0 , швидкість струменя в рідині ω менша за швидкість струменя ω_0 в соплі.



Газовий струмінь входить суцільним факелом у рідину, глибина занурення струменя - h , його швидкість поступово зменшується, з боків струменя утворюються спрямовані вгору циркуляційні потоки; всередину газового струменя втягуються «відірвані» краплі рідини [5].

Швидкість газу на осі струменя на рівні поверхні рідкої ванни залежить від відстані між вихідним перерізом фурми та поверхнею ванни:

$$\omega = \frac{B\omega_0}{\frac{x}{d_0}} \quad [6.1]$$

де x - відстань між вихідним перерізом фурми та поверхнею ванни, мм;

B – коефіцієнт, що залежить від значення $\frac{x}{d_0}$ і відношення щільностей газу,

що витікає з фурми, і середовища, в яке спливає газовий струмінь.

Зі збільшенням $\frac{x}{d_0}$ величина B зростає до деякого максимального значення (B_{max}), після чого практично не змінюється. На основній ділянці струменя, починаючи з $\frac{x}{d_0} > 2B_{max}$, значення B залишається практично постійним. В

умовах подачі кисню з фурми в порожнину конвертера відношення щільностей газів (кисню і газового середовища) в конвертері, а також значення B практично не змінюються. Тому швидкість на осі струменя на рівні поверхні ванни визначається відносною відстанню $\frac{x}{d_0}$ між вихідним перерізом фурми і

поверхнею ванни: чим більша ця відстань, тим менша швидкість струменя на рівні поверхні ванни [6].

Струмінь кисню, що направляється на поверхню рідкої ванни, впроваджується в останню на деяку глибину. Глибина занурення зростає із збільшенням швидкісного напору струменя на рівні поверхні ванни:

$$h = \frac{n}{\gamma_p} \cdot \frac{\gamma_g \omega^2}{2g} \quad [6.2]$$

де h - максимальна глибина занурення, м;

n - коефіцієнт проникнення швидкісного напору;

γ_p та γ_g - об'ємна маса рідини та газу, кг/м³;

ω - швидкість газу на осі потоку на рівні поверхні рідкої ванни, м/сек;

g - прискорення сили тяжіння, м/сек.

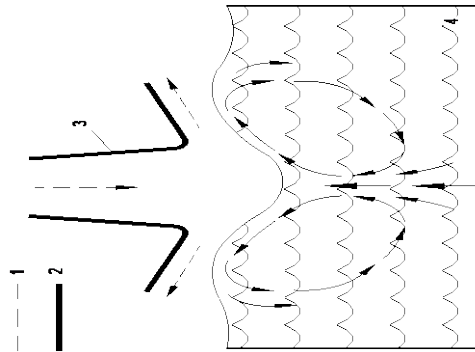
Вільний струмінь (ламінарний або турбулентний) неоднаково діє на рідину. Ламінарний струмінь - вузький, рівний, утворює на поверхні води вузьку глибоку западину-лунку. Турбулентний струмінь утворює в місці зіткнення з рідиною широку і менш глибоку западину. В обох випадках зі збільшенням швидкості струменя глибина та ширина западини збільшуються



[5].

Струмінь, зіткнувшись з рідкістю, утворює в останній кратерообразную западину, форма якої, як вказувалося, визначається відстанню між трубкою і поверхнею і інтенсивністю дуття. Проникаючи в рідину струмінь частково відбивається і внаслідок тертя приводить у рух ванну рідини навколо струменя. При відносно невеликій швидкості (до початку та при слабкому розпиленні рідини) западина дрібна (**мал. 2а**). Відбитий струмінь залишає рідину по дотичній до лінії западини. Рідина циркулює. Вторинний струмінь, як у соплі, що розширюється, обумовлює розрідження на стінці кратера. При досить великій швидкості дуття та глибокій западині (**мал. 2б**). спостерігається сильне розпилення рідини. Крапельки рідини захоплюються струменем, що виходить, падають по параболічним траєкторіям назад в рідку ванну. Частина крапельок проскакує струмінь, що виходить, захоплюється первинним струменем і повертається у ванну, створюючи кругообіг рідини, спрямований всередину [5].

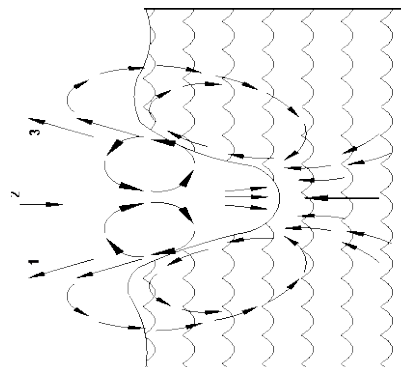
- 1 – напрямок струменя;
- 2 – напрямок потоків в рідині;
- 3 – повітряний струмінь;
- 4 – рідина



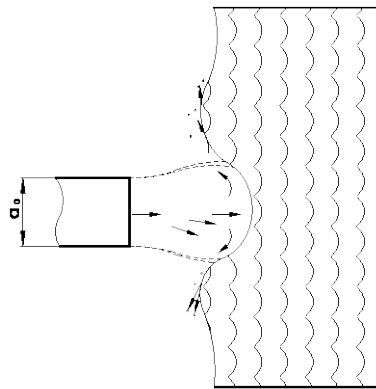
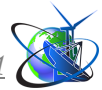
Мал. 2а. Схема руху ванни за наявності дрібної западини

Взаємодія струменя газу з рідиною може бути різною залежно від величин динамічного натиску в осьовій частині струменя на межі газ-ванна h_x (або осьової швидкості струменя ω), які визначаються тиском дуття, висотою підйому фурми над ванною та іншими факторами.

- 1, 3 – струмінь, що виходить;
- 2 – повітряний струмінь;
- 4 – рідина



Мал. 2б. Схема кругообігу рідини при дутті до сильного розпилення



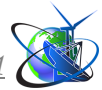
Мал. 2в. Взаємодія струменя газу з рідкістю при малих тисках

При малих значеннях h_x , тобто при малому тиску p і великій висоті фурми x струмінь утворює виїмку (кратер) в рідині, що відбивається і розтікається на поверхні ванни; при деякому збільшенні h_x рідина подрібнюється, краплі викидаються відбитим струменем (мал. 2в) [7].

У конвертері є циркуляція рідини - загальна та у кожного сопла (або фурми). При близькому розташуванні сопел у днищі відбувається наближення струменів під впливом циркуляції та злиття їх із утворенням суцільних каналів, т. е. утворюються розриви рідини. Рідина обертається і горизонтальній площині, відбуваються коливання рідини, при резонансі — сплески хвиль. При підвищенні в'язкості рідини картина розподілу газу (повітря) та рідини змінюється: порушується або зникає правильна циркуляція рідини, бульбашки великі, рідина дробиться на великі краплі; відбуваються викиди рідини (металу, шлаку); контакт газу та рідини погіршується [5].

При продуванні зверху характер взаємодії газового струменя з рідиною залежить від динамічного натиску (швидкості) струменя на межі газ-ванна. При малих значеннях динамічного напору (швидкості) струмінь утворює лунку рідини, відбивається і розтікається поверхнею ванни; при великих значеннях динамічного натиску відбувається розбризування рідини, але основна частина струменя проникає в рідину, підсмоктує (відриває) рідину і дробить її на дрібні краплі. Спостерігається також циркуляція та утворення бульбашок газу. Таким чином, при достатньому тиску газу і невеликій висоті фурми газовий струмінь входить в рідину спочатку теж суцільним струменем-факелом. У реальних умовах струмінь нерідко занурений у шлакометалеву піну.

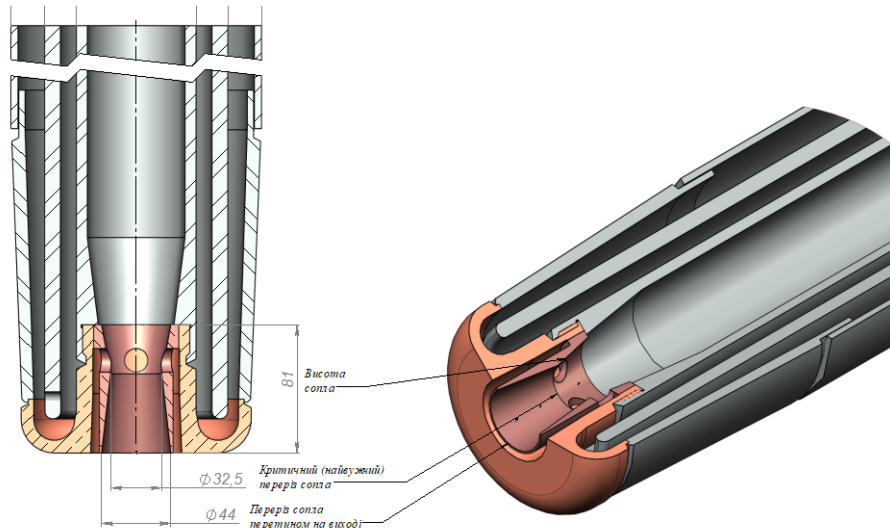
При продуванні зверху глибина проникнення струменя в рідину збільшується зі збільшенням тиску чи швидкості, газу, діаметра сопла та зменшенням висоти сопла над рівнем рідини. При продуванні зверху киснем останнім часом, крім односоплових фурм, стали застосовувати три- і чотирисоплові. Сопла нахилені до вертикалі на кут 6-15 град., утворюючи струмені, що розходяться. Як показав досвід зарубіжних та вітчизняних заводів, багатосоплові фурми дозволяють значно збільшити (30—40%) інтенсивність продування за збереження спокійного характеру її (без викидів) та збільшити вихід придатного [5].



Рафінування в основному конвертері в умовах ПФК

В основному конвертері на Побузькому феронікелевому комбінаті проводиться остаточне рафінування напівпродукту з метою одержання товарного феронікелю. При вмісті кремнію в чорновому феронікелі менш, ніж 1,5% рафінування дозволяється проводити в одну стадію в основному конвертері. Після заливки напівпродукту конвертер встановлюється у вертикальне положення, опускається фурма і починається продування.

Для рафінування феронікелю в кислій стадії застосовується односоплова фурма з мідним наконечником, з критичним перерізом сопла – 32,5 мм; перетином на виході – 44,0 мм; висотою сопла – 81 мм (мал. 3).



Мал. 3. Односоплова фурма з мідним наконечником

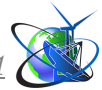
Залежно від хімічного складу чорнового феронікелю, а також кількості перероблюваного холодного металу, що містить нікель, для продування може бути використана фурма з трисопловим наконечником [8].

Продування проводиться при тиску кисню не нижче 10 ат ($10,1 \times 10^6$ Па) по манометру на цеховому колекторі, витрата кисню – 100–170 м³/хв, чистота кисню не менш, ніж 99,5%. Положення фурми змінюється над рівнем дзеркала ванни в залежності від складу, температури чорнового феронікелю та заданого режиму.

Для шлакоутворення по ходу продування додається вапняк або вапно з розрахунку отримання основності шлаку (співвідношення CaO/SiO₂) в межах 2–3. Витрата вапняку визначається машиністом дистриб'ютора залежно від вмісту кремнію, сірки, фосфору в напівпродукті. Тривалість першого продування визначається машиністом дистриб'ютора візуально по факелу до повного окислення вуглецю. Після закінчення першого продування на розсуд бригадира відбирається проба металу для визначення вмісту вуглецю, кремнію, сірки, фосфору, хрому, нікелю, міді, кобальту. З метою коригування хімічного складу та температури феронікелю можливі наступні продування. Після кожного продування проводиться відбір проб для визначення хімічного складу [8].

Рафінування у кислому конвертері в умовах ПФК

Після заливки феронікелю кислий конвертер встановлюється у

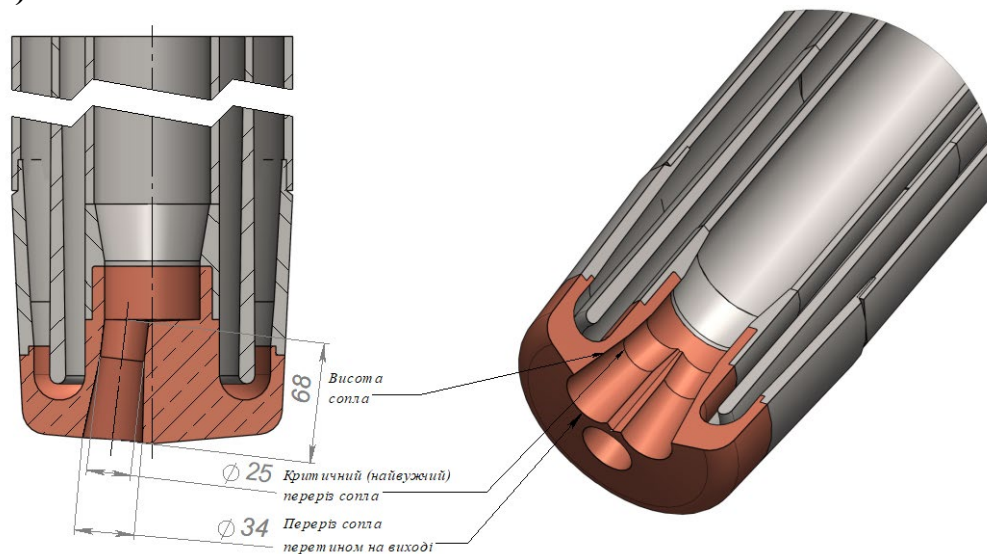


вертикальне положення, опускається фурма і починається продування киснем. До початку продування під конвертером повинні бути встановлені шлакова чаша, коробка, а на металовозному візку – ковш з температурою футерування не нижче 400°C.

З ціллю нормального запалювання плавки при продуванні чорнового феронікелю з пониженою температурою менше 1180 °С і високим вмістом кремнію в металі (вище 6%), після заливання металу в конвертер необхідно зробити завалку пилоподібного матеріалу, що містить нікель (окаліни, струженини, пилу), у кількості, що вказана в технологічній інструкції, почати продування. Забороняється проводити заливку металу на шлак, тому що при цьому можливі викиди металу з конвертера. Перед початком продування необхідно переконатися, що фурма справна, немає течі, сопло не забито і немає розпалу [8].

Для рафінування феронікелю у кислій стадії застосовується односоплова фурма з мідним наконечником, з критичним перерізом сопла – 32,5 мм; перетином на виході – 44,0 мм; висотою сопла – 81 мм (мал. 3).

Залежно від хімічного складу чорнового феронікелю, а також кількості перероблюваного холодного металу, що містить нікель, для продування може бути використана фурма з трисопловим наконечником, з критичним перерізом кожного сопла – 25,0 мм; перетином на виході – 34,0 мм; висотою сопла – 68 мм (мал. 4).



Мал. 4. Трисоплова фурма з мідним наконечником

Залежно від хімічного складу чорнового феронікелю, а також кількості перероблюваного холодного металу, що містить нікель, для продування може бути використана фурма з трисопловим наконечником, з критичним перерізом кожного сопла – 25,0 мм; перетином на виході – 34,0 мм; висотою сопла – 68 мм (мал. 4).

Продування проводиться також при тиску кисню не нижче 10 ат ($10,1 \times 10^6$ Па) по манометру на цеховому колекторі, витрата кисню – 100–170 м³/хв, чистота кисню не менш, ніж 99,5%. Положення фурми змінюється над рівнем дзеркала ванни в залежності від складу, температури чорнового феронікелю та



заданого режиму.

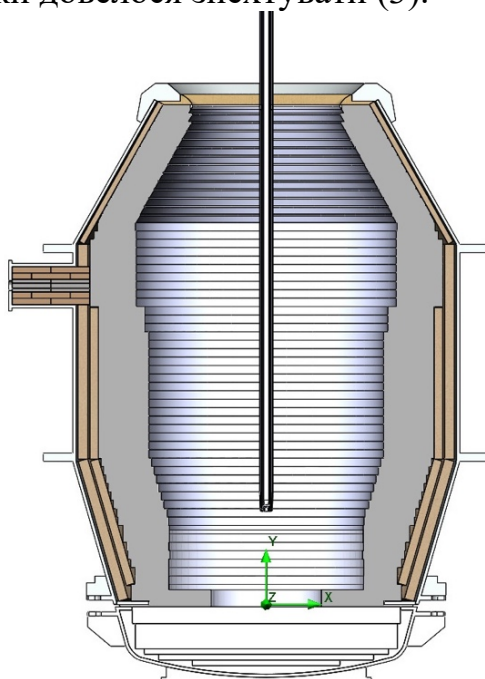
Тепловий режим плавки може регулюватися завантаженням в конвертер відходів нікелю, холодного чорнового феронікелю, нікелевої або залізної руди. Витрата охолоджувачів визначається в залежності від температури кладки конвертера, від ваги, хімічного складу та температури чорнового феронікелю. При цьому машиніст дистриб'ютора повинен враховувати, що основним джерелом хімічного тепла процесу є реакція окислення кремнію, що має найвищий тепловий ефект [8].

Моделювання продування в феронікелевому конвертері

Для побудови геометрії моделі феронікелевого конвертера використовувався програмний комплекс системи автоматичного проектування SolidWorks. Ґрунтуючись на проектних кресленнях, підготували тривимірну модель металевого корпусу конвертера, в неї встановили арматурне і робоче футерування відповідно до реального робочого проекту, встановили кисневу фурму зі змінним наконечником (мал 5).

Під час підготовки умов моделювання враховувалися реальні значення - тиск кисню 10 ат ($10,1 \times 10^6$ Па) по манометру на цеховому колекторі, витрата кисню – 150 м³/хв. Положення фурми над рівнем дзеркала ванни (як для односоплової, так і для трисоплової) не змінювалося і становило $x = 216$ мм (відстань між вихідним перерізом фурми та поверхнею ванни).

Для формулювання математичної моделі були зроблені наступні припущення: розглядалися лише рідкий шлак, метал і кисень (1); кисень розглядався як стисливий ідеальний газ і, таким чином, дотримувався співвідношення $pV = \nu RT$, а розплав – як нестислива ньютонівська рідина (2); в'язкість і поверхневий натяг усіх фаз були постійними (3); хімічними реакціями процесу плавки довелося знехтувати (3).



Мал. 5. Тривимірна модель основного конвертера рафінування феронікелю



Додатковий модуль Flow Simulation дозволяє моделювати потоки рідини та газу для обчислення різних характеристик, таких як температура, швидкість потоку, об'ємна та масова концентрація рідини, тощо. Модуль розв'язує рівняння Нав'є-Стокса, які є формулюваннями законів збереження маси, імпульсу та енергії для потоків рідини. Рівняння доповнюються рівняннями стану рідини, що визначають природу рідини, і емпіричними залежностями густини рідини, в'язкості і теплопровідності рідини від температури. Непружні неньютонівські рідини розглядаються шляхом введення залежності їх динамічної в'язкості від швидкості зсуву потоку і температури, а стисливі рідини — шляхом введення залежності їх густини від тиску. Задача конкретизується визначенням її геометрії, граничних і початкових умов.

Програма для моделювання здатна передбачати як ламінарні, так і турбулентні потоки. Ламінарні потоки виникають при низьких значеннях числа Рейнольдса, коли число Рейнольдса перевищує певне критичне значення, потік стає турбулентним, тобто параметри потоку починають хаотично коливатися. Більшість потоків рідини, які зустрічаються в інженерній практиці, є турбулентними, тому модуль було розроблено в основному для моделювання та вивчення турбулентних потоків. Для прогнозування турбулентних потоків використовуються усереднені за Фавром рівняння Нав'є-Стокса, де враховуються усереднені за часом ефекти турбулентності потоку на параметри потоку, тоді як інші, тобто великомасштабні, залежні від часу явища враховуються безпосередньо. Завдяки цій процедурі в рівняннях з'являються додаткові члени, відомі як напруги Рейнольдса, для яких необхідно надати додаткову інформацію. Щоб закрити цю систему рівнянь, програмний модуль використовує рівняння переносу для турбулентної кінетичної енергії та швидкості її дисипації, так звану модель $k - \varepsilon$ [9].

Масообмін сумішах рідин визначається рівняннями збереження часток. Рівняння, що описують концентрації компонентів суміші, можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \rho y_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i y_m) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((D_{mn} + D_{mn}^t) \frac{\partial y_m}{\partial x_i} \right) + S_m \quad [9.1]$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

Тут D_{mn}, D_{mn}^t — молекулярна і турбулентна матриці дифузії, S_m — швидкість виробництва або споживання m -го компонента.

У випадку закону дифузії Фіка:

$$D_{mn} = D \cdot \delta_{mn}, \quad D_{mn}^t = \delta_{mn} \cdot \frac{\mu_t}{\sigma} \quad [9.2]$$

Між концентраціями видів має місце наступна алгебраїчна залежність:

$$\sum_m y_m = 1 \quad [9.3]$$

Якщо газоподібна (або рідка) речовина дифундує в газоподібній (або рідкій) рідині (якщо ця рідина тече і переносить іншу речовину, цю рідину



зазвичай називають рідиною-носієм), і масова частка цієї речовини у в рідина носії занадто мала, тобто $y \ll 1$, то вона не може вплинути на властивості потоку рідини-носія (швидкість, тиск, температуру), а потім на розподіл цієї речовини в обчислювальній області через перенесення її потоком рідини та її дифузії в цю рідину. Згідно з цією опцією, дифузія цієї речовини оцінюється в попередньо розрахованому стаціонарному або нестаціонарному потоці рідини-носія шляхом вирішення наступного рівняння, враховуючи нерівномірність концентрації речовини та градієнт тиску рідини-носія (лише для газоподібних рідин):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho y u_i - \frac{\rho R T}{p m} \left(\frac{\mu}{Pr \cdot Le} + \frac{\mu_t}{Pr_t \cdot Le_t} \right) \frac{\partial y}{\partial x_i} \right] = \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{m_1 m_2}{m^2} \left[\frac{\rho y v_i - y}{p} \left(\frac{\mu}{Pr \cdot Le} + \frac{\mu_t}{Pr_t \cdot Le_t} \right) \frac{\partial p}{\partial x_i} \right] \end{aligned} \quad [9.4]$$

де: ρ – густина рідини-носія і суміші речовини (оскільки $y \ll 1$, то ρ можна вважати густиною рідини-носія);

t – час;

x_i – i -та компонента використовуваної системи координат;

u_i – i -та складова швидкості несучої рідини (речовина має однакову швидкість);

p – статичний тиск рідини-носія;

R – універсальна газова стала;

m – молярна маса рідини-носія та суміші речовини;

m_1 – молярна маса речовини;

m_2 – молярна маса рідини-носія;

v_i – питомий об'єм речовини;

μ – ламінарна в'язкість рідини-носія;

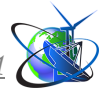
μ_t – турбулентна в'язкість рідини-носія;

Pr, Pr_t – ламінарне та турбулентне числа Прандтля несучої рідини;

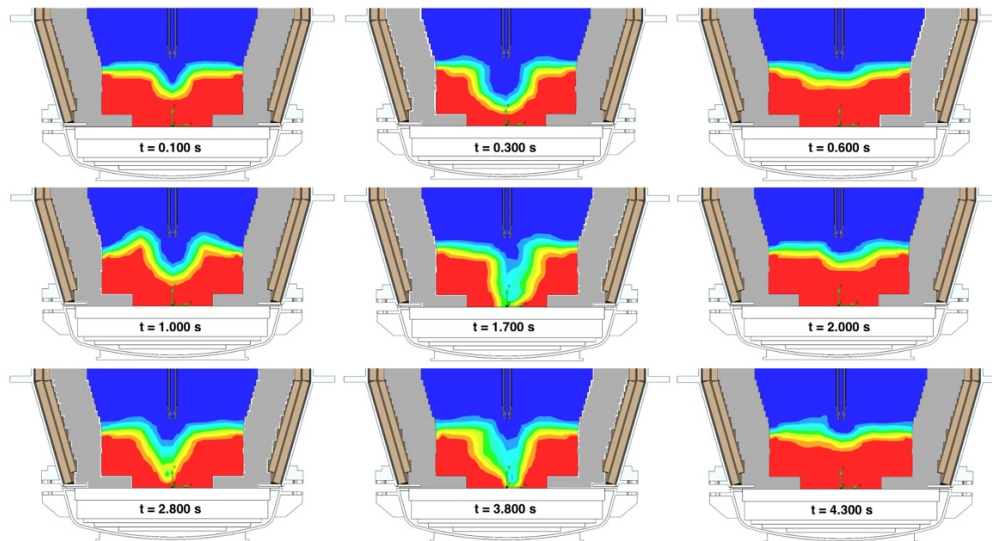
Le, Le_t – ламінарне та турбулентне числа Льюїса несучої рідини. [9]

Рівняння розв'язується в обчислювальній області (або її підобласті) із заданими користувачем граничними умовами, початковими умовами та джерелами об'єму речовини, що переноситься потоком рідини (або газу). В нашому випадку завдання зведено до того, що обчислювальна область визначена як внутрішня порожнина конвертера, обумовлена його робочим футеруванням, рідина – це розплав, газ подається через фурму із заданими умовами, параметри моделювання ідеальні (конвертер та фурма розташовані строго вертикально).

На мал. 6 та 7 відображена об'ємна концентрація розплава в конвертері при моделюванні роботи односоплової та трисоплової фурми в часі, яка є мірою об'єму розчиненої рідини у заданому об'ємі робочої порожнини конвертера. Для проведення аналізу та зіставлення результатів між двома фурмами, обрані наступні часові позначки – 0,1 с; 0,3 с; 0,6 с; 1 с; 1,7 с; 2 с; 2,8 с; 3,8 с; 4,3 с. При впливі струменя газу на ванну конвертера на мал. 6



спостерігається «пульсаційний» характер западини, що повторюється з часом (1,7 с, 3,8 с), розплав періодично «пробивається» струменем газу практично до дна конвертера, що безумовно може вплинути негативно на футеруванні агрегату, зменшуючи його термін служби.



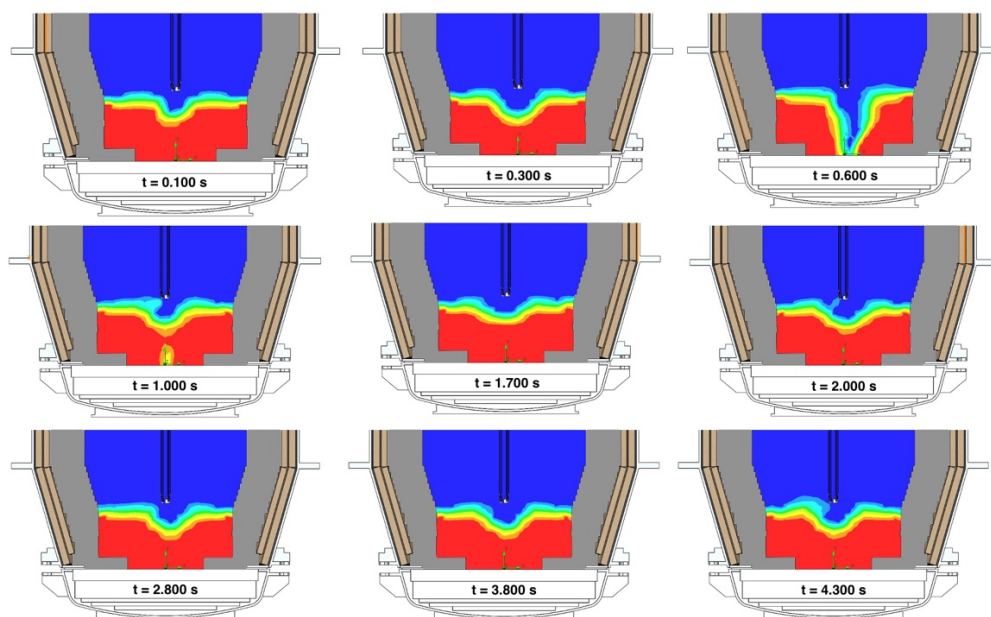
Мал. 6. Односоплова фурма. Об'ємна концентрація рідини

При роботі фурми з одним соплом, ширина западини в рідині залишається майже постійною під впливом газу, змінюється лише глибина западини, спостерігається утворення хвиль, гребінців по краях западини, характер та форма яких змінюються в часі. Okремо варто звернути увагу на периферію металеві ванни конвертера, на яких об'ємна концентрація рідини практично не змінюється, що може опосередковано свідчити як про недостатнє перемішування розплаву в цій області, так и про меншу дію розплаву на робоче футерування стін конвертера.

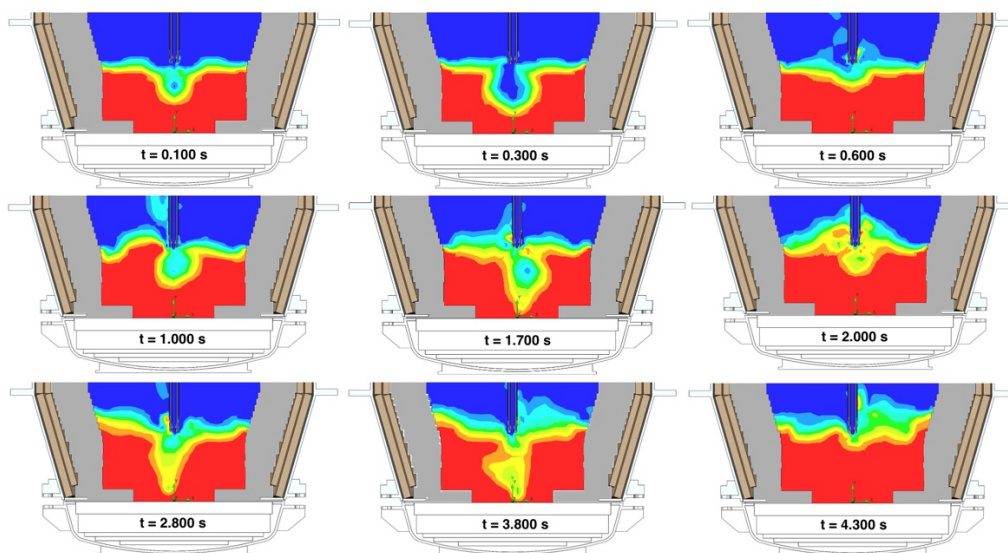
Картина з використанням трисоплової фурми та розподіл об'ємної концентрації рідини, як вказано на мал. 7, має дещо інший характер. По-перше відсутня пульсація западини, що формується потоком газу з фурми, а «простріл» до дна конвертера спостерігається тільки на одній часовій ділянці – біля 0,6 секунди. Враховуючи, що перехід від одного режиму до іншого (початок продування) відбувається стрибкоподібно, оскільки фурма багатосоплова, а струмені газу турбулентні, можемо припустити, що такий ефект пов'язаний з початком роботи фурми при моделюванні процесу. В такому випадку, вплив продування на термін служби футерування дна конвертера буде меншим, ніж у попередньому варіанті.

Додатково фіксуємо більш стабільну поведінку западини, вона не така глибока як на мал. 6, але візуально здається ширше. Хвилі та гребені по краях западини менші, характер і форма стабільніші за попередню, об'ємна концентрація рідини біля стін практично не змінюється.

Масова концентрація рідини, яка відображена на мал. 8 та 9, також відома як масовий відсоток рідини, показує скільки маси розплаву розчинено в заданому об'ємі робочої порожнини конвертера та з якою концентрацією.



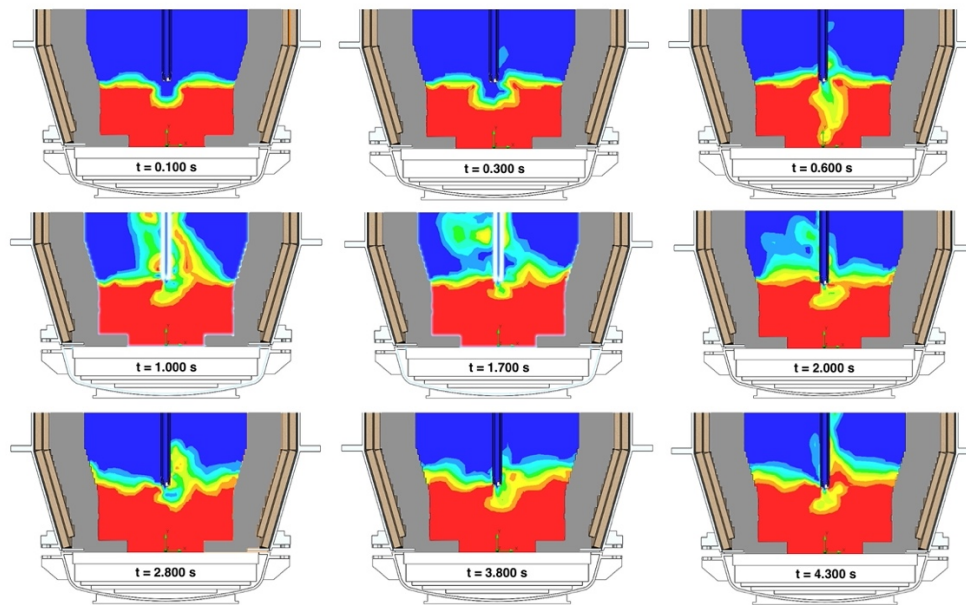
Мал. 7. Трисоплова фурма. Об'ємна концентрація рідини



Мал. 8. Односоплова фурма. Масова концентрація рідини

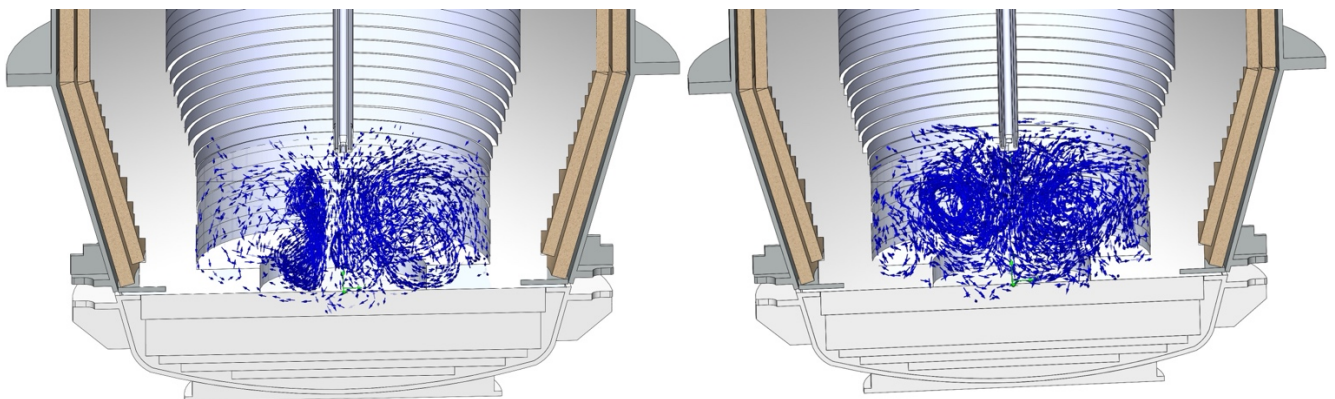
Як і у випадку з об'ємною концентрацією рідини, на мал. 8 спостерігається, характерна для фурми з одним соплом, пульсація, при якій газовий струмінь пробивається до дна конвертера на 1,7 с, 2,8 с, 3,8 с. На мал. 9 ми не бачимо такого ефекту. При цьому, подібний ефект спостерігається на позначці 0,6 с, але це явище можна знову пов'язати з початком продування.

При візуальному порівнянні відзначається більш стабільна западина під час роботи трисоплової фурми, тоді як фурма з одним соплом постійно змінює ширину та глибину западини в часі, надаючи їй непередбачувану форму. Можна припустити, що багатосоплова фурма дозволяє проводити продування розплав при збереженні більш спокійнішого (з меншою турбулентністю) характеру перемішування, з меншим впливом на цілісність робочого футерування дна конвертера.



Мал. 9. Трисоплова фурма. Масова концентрація рідини

Питання ефективності перемішування ванни конвертера неможливо достовірно оцінити виходячи з мал. 6-9, оскільки там не відображається потрібної для цього інформації. Тож для того, щоб побачити процес руху частинок газу в розплаві, їх кількість на напрям, проаналізувати хід перемішування, проводилося комп'ютерне моделювання траєкторії пруху газу в рідини. Порівняльні зображення для односоплової та трисоплової фурми зображені на мал. 10.



Мал. 10. Траєкторія потоку газу в рідині (односоплова фурма зліва, трисоплова - справа)

Фурма з одним соплом показує рівномірне перемішування ванни навколо власної вертикальної осі, рідина циркулює, відбиваючись від дна та стін конвертера. Спостерігається невелике розпилення рідини, крапельки рідини захоплюються струменем газу і виносяться за межі ванни у напрямку від фурми до стін конвертера. Перемішування носить більш інтенсивний характер в області западини та вертикальної осі фурми, і спадає в міру віддалення від осі фурми та наближення до стін у горизонтальній площині. Рух потоків газу в безпосередній близькості до дна конвертера візуалізується чітко, з великою



кількістю векторів, що також вказує на високу інтенсивність перемішування.

Грунтуючись на моделюванні, можемо сказати, що трисоплова фурма краще перемішує ванну з рідиною, при однакових параметрах тиску і витрати газу, кількість векторів траєкторії потоку газу набагато більше, ніж у односопловій. При такій траєкторії руху, коли рідина циркулює, відбиваючись від дна і стінок металеві ванни конвертера, перемішування не має такого «загасання» в напрямку від вертикальної осі фурми до стінки. Можна припустити, що застосування трисоплової фурми, збільшивши інтенсивність перемішування, дозволить досягти повного окислення вуглецю при рафінуванні феронікелю в більш короткий термін, що дозволить швидше відібрати пробу металу для визначення вмісту необхідних хімічних елементів, скорочуючи тривалість плавки.

Трисоплова фурма, виходячи з мал. 10, в рівній мірі впливає на робоче футерування дна і стін металеві ванни конвертера.

Варто відзначити, що ремонт робочого футерування стін металеві ванни конвертера складніший, у той час як дно можна наростити, використовуючи брикети зі вмістом магнезиту або інші підручні матеріали, такі як, наприклад, бій магнезійної цегли.

Висновки

1. Характер взаємодії газового струменя з рідиною, форма та розміри западини більш стабільні при застосуванні трисоплової фурми.

2. Інтенсивність перемішування ванни металу при використанні трисоплової фурми вище та рівномірніше за об'ємом розплаву, ніж при використанні фурми з одним соплом.

3. Ефект збільшення кількості сопел фурми може призвести до скорочення тривалості плавки, зменшення часу прибуття металу в конвертері, підвищення продуктивності і стійкості футерування агрегату, зниженню питомих витрат.

4. Односоплова фурма більшою мірою впливає на футерування дна конвертера, що може призвести до випереджального зносу та утворення лунки.

5. Фурма з трьома соплами впливає як на робоче футерування стін, так і на футерування дна конвертера.

Літературні джерела:

1. Факти про нікель: <http://www.nickelinstitute.org>; 10.08.2023.

2. Нікель: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel>; 10.08.2023.

3. Ресурси і запаси нікелю:

https://uk.wikipedia.org/wiki/Ресурси_і_запаси_нікелю; 11.08.2023.

4. Опис виробництва феронікелю на ТОВ «ПФК»: <https://pfk.com.ua/>; 10.08.2023.

5. Лапіцький В. І., Левін С. Л., Легкоступ О. І., Ступар Н. І., Афанасьєв С. Р. Конвертерні процеси виробництва сталі: вид-во «Металургія»; 1970 р.

6. Афанасьєв С. Г. Короткий довідник конвертерника: видавництво «Металургія»; 1967 р.

7. Баптизмманський В. І. Чорна металургія; №10; 1962 р.

8. Рибак В.В. Технологічна інструкція рафінування чорного феронікелю;



№ 001; 2022 p.

9. Технічна довідка. Solidworks Flow Simulation - англійська версія; 2022 p.

Abstract. *The final phase of ferronickel production process, one of the options of oxidized nickel ores processing before granulation, is ferronickel refining. Ferronickel refining technological methods at industrial enterprises in the world mainly consist of the similar steps of production with minor variations, but the process in vertical oxygen converters is often used. The two-stage (duplexity) nature of ferronickel refining lies in the fact that smelting by-product, which is formed in the initial period of processing of rough ferronickel, contains a lot of silicon oxide, accordingly, the first phase of refining is carried out in converters with silica lining. The second stage of processing with removing of chromium, carbon, sulfur, phosphorus, and other admixtures, is carried out in converters with basic linings. This article is about converters with upper oxygen supply.*

Therefore, the purging process with oxygen is required in order to reduce the content of sulfur, phosphorus, carbon and iron in FeNi metal to a given level. Oxidation of impurities occurs mainly in the circulation zone, where the metal collides with the lining, slag and melt additives. Visual inspection, study of the gas jet, the process of circulation of liquid metal and slag inside the converter is impossible, because the environment is opaque, converter has a metal body and a refractory lining. In this report, computer simulation of the hydrodynamic process of purging a converter bath using single-nozzle and three-nozzle lances will be investigated, where the nozzles are located at different angles to the vertical. On the base of examples of modeling the volumetric concentration of liquid, the mass concentration of liquid and the trajectory of gas movement in the melt, methods for increasing of the efficiency and stability of purging are considered. The issue of durability of the unit lining are highlighted.

Key words: *ferronickel refining, converter, oxygen lance, single-nozzle lance, three-nozzle lance, modeling of the purging process, durability of the unit lining.*

Статтю надіслано: 23.10.2023 p.

© Акрєєв В. В.