**Лекція 7**

**Порційне та циркуляційне вакуумування**

##  Порційне вакуумування

Збільшення відносної поверхні рідкого металу в процесі вакуумної обробки з метою підвищення її ефективності може бути досягнуто, якщо одночасно вакуумуванню піддавати не всю масу металу в ковші, а невелику її частину. З цією метою були розроблені способи порційного та циркуляційного вакуумування в спеціальних камерах.

Спосіб порційного вакуумування з засмоктуванням в вакуум-камеру одночасно лише ~10 % всього металу у ковші був розроблений в 1956 г. За початковими буквами фірми-розробника (Dortmunder Herder Hüttenunion – Німеччина) він зазвичай називається процесом DH.

Обробка сталі відбувається в футерованій вакуум-камері (рис. 7.[1](#_bookmark57)), в яку метал засмоктується через футерований зсередини і ззовні патрубок внаслідок створення в камері розрідження. Одночасно засмоктується 8–12 % загальної маси металу в ковші. Рівень металу в вакуум-камері приблизно відповідає зовнішньому атмосферному тиску.



1 – вакууматор; 2 – ківш у верхньому положенні; 3 – ківш в нижньому положенні

Рисунок 7.1 – Схема установки порційного вакуумування сталі

При русі ковша вниз або вакуум-камери вгору метал витікає з вакуум- камери в ківш (залишається лише в патрубку), а при зворотному русі знову засмоктується в камеру, де піддається вакуумній обробці. Таким чином, сталь,

що знаходиться в ковші, і порція вакуумованої сталі, що надходить з вакууматора, перемішуються, і досягається однорідність обробленого металу.

В процесі вакуумування вакуум-камера рухається у встановлених межах автоматично із заданою нерівномірною швидкістю. Вона менша при русі камери вниз, коли відбувається інтенсивна дегазація, і більша при русі вгору, коли дегазація менш інтенсивна. З цієї ж причини швидкість руху камери менша на початку вакуумної обробки і більша в кінці.

Один цикл обробки, що включає наповнення та звільнення вакуум-камери до рівня з'єднання її з патрубком, продовжується 15–30 с. Кількість циклів, необхідних для досягнення визначеної мети обробки (видалення водню, вуглецевого розкислення, окислення вуглецю, перемішування), оцінюється коефіцієнтом рециркуляції. Він дорівнює відношенню сумарної маси металу, що пройшла через камеру за час обробки, до маси металу в ковші. Зазвичай при порційному вакуумуванні сталі коефіцієнт рециркуляції дорівнює 3–4.

Тиск у вакуум-камері по ходу обробки змінюється (рис. 7.2). Протягом 15– 30 циклів він ступінчасто знижується до 50–100 Па. Такий характер зміни тиску викликаний тим, що під час засмоктування сталі в камеру відбувається інтенсивна дегазація з виділенням великої кількості газу та підвищенням тиску. Під час витікання металу при русі камери вниз зменшується дегазація, і внаслідок безперервної роботи вакуум-насосів тиск у камері падає. Зважаючи на зменшення вмісту газів в сталі і інтенсивності їх видалення висота піків на кривій тиску безперервно знижується кожним наступним циклом, і через 20–25 циклів затікання нових порцій в камеру практично не призводить до зміни тиску в ній. Це свідчить про досить глибоку дегазацію (розкислення).

Для зменшення втрат тепла вакуум-камеру перед вакуумуванням прогрівають до 1500–1560 °С з використанням системи електронагріву або газокисневих пальників. За час вакуумування температура металу знижується всього на 10–30 °С. Додаткове охолодження металу може відбуватися у разі

присадки значної кількості деяких феросплавів (феромарганцю, ферохрому).



Рисунок 7.2 – Зміна тиску у вакуум-камері при порційному вакуумуванні сталі

Одним з основних процесів, що забезпечують поліпшення якості сталі при порційному вакуумуванні, є зниження вмісту кисню в результаті вуглецевого розкислення. Воно відбувається інтенсивно на початку вакуумної обробки і в основному завершується вже через 10–15 циклів, тобто при коефіцієнті рециркуляції менше 2 (рис. 7.3). При вакуумуванні сталі, що містить 0,15– 0,20 % і більше вуглецю, вміст (активність) розчиненого в неї кисню знижується до рівня 0,004–0,005 %. У процесі подальшої обробки вміст кисню практично не знижується.

Слід зазначити, що активність кисню, що досягається, унеможливлює реакцію окислення вуглецю в процесі кристалізації сталі при звичайному атмосферному тиску і забезпечує отримання якісного злитка спокійної сталі. Вона знаходиться практично на тому ж рівні, що й при розкислюванні алюмінієм. Але і в цьому випадку присадка алюмінію після вакуум-вуглецевого розкислення необхідна для попередження можливості погіршення якості зливка в результаті вторинного окислення, а також для усунення схильності сталі до старіння.

Ступінь пониження активності (вмісту розчиненого у сталі) кисню і його кінцевий вміст у розчині при вакуумуванні нерозкисленої сталі залежать від вмісту вуглецю (рис. 7.4). Це цілком закономірно, оскільки вуглець в процесі вакуумної обробки грає роль розкислювача, і з підвищенням його вмісту активність кисню знижується. Разом з тим, при низькому вмісті вуглецю початковий вміст кисню в нерозкисленій сталі перед вакуумуванням вище. Це призводить до того, що при вуглецевому розкисленні у вакуумі маловуглецевої сталі (< 0,15–0,20 % C) вміст розчиненого в металі кисню і його активність вище, ніж при розкислюванні алюмінієм.



*N* – число циклів; *kр* – коефіцієнт рециркуляції

Рисунок 7.3 – Зміна активності (1) і загального вмісту (2) кисню при порційному вакуумуванні сталі (0,2 % C, 0,25 % Si, 0,5 % Mn, без Аl)



1 – в нерозкисленій сталі при випуску з печі або конвертера; 2 – після порційного вакуумування; 3 – після розкислення алюмінієм

Рисунок 7.4 – Залежність активності кисню в сталі від вмісту вуглецю

Вельми низький ефект розкислення вуглецем в вакуумі має місце при обробці особливо низьковуглецевої сталі. При порційному вакуумуванні сталі з початковим вмістом вуглецю < 0,03 % наприкінці вакуумування (до розкислення) не вдається отримати вміст кисню менше 0,06–0,08 %. Але вже при початковому вмісті вуглецю в сталі 0,04–0,06 % вміст кисню в сталі після вакуумування знижується майже вдвічі – до 0,03–0,04 %.

Поруч із зниженням активності кисню, тобто зниженням вмісту розчиненого в металі кисню, при порційному вакуумуванні зменшується і загальний його вміст, що визначається методом вакуум-плавлення (див. рис. 7.3), що є свідченням видалення зі сталі оксидних неметалічних включень. Цьому сприяє інтенсивне перемішування металу при засмоктуванні його в вакуум-камеру і зливі з неї в ківш під час кожного з 30–60 циклів обробки. У результаті перемішування включення швидко переносяться до міжфазних поверхней і видаляються з металу. Таким чином, кисень зі сталі видаляється механічним шляхом, і при вакуумній обробці повністю розкисленої сталі такий шлях є по суті єдиним, оскільки вуглецеве розкислення такої сталі практично неможливо.

Проте слід зазначити, що видалення кисню у вигляді оксидних включень механічним шляхом відбувається повільніше, ніж в результаті вуглецевого розкислення. Про це свідчать, наприклад, результати, наведені на рис. 7.3: зниження загального вмісту кисню (в даному випадку переважно у включеннях) до < 0,005 % відбувається значно повільніше і воно практично недосяжне. У цьому полягає основний недолік вакуумування повністю розкисленої сталі.

При порційній обробці сталі (порівняно зі звичайною плавкою без такої) отримують не тільки меншу кількість оксидних неметалічних включень, але й менші їх розміри (бал) у готовій сталі. При вакуумуванні нерозкисленої або неповністю (без алюмінію) розкисленої сталі це пояснюється вельми низьким вмістом кисню в момент присадки алюмінію або всіх розкислювачів. При

вакуумній обробці повністю розкисленої сталі це є наслідком інтенсивного видалення великих (більше 10 мкм) неметалічних включень.

Оскільки при вакуумній обробці нерозкисленої або не повністю розкисленої сталі видалення з неї кисню відбувається в результаті окислення вуглецю, одночасно з пониженням вмісту кисню знижується і вміст в ній вуглецю. Це не має істотного значення при вакуумній обробці високо- і навіть низьковуглецевої сталі, але дуже важливо при обробці сталі з особливо низьким вмістом вуглецю (< 0,03 %).

Переконаємося в цьому на прикладі, порівнявши ступінь зниження вмісту вуглецю в сталі з різним початковим вмістом вуглецю і, відтак, кисню:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| [C, %]поч | [O, %]поч | [O, %]кін | [O, %] | [C, %] | [C, %]кін |
| 0,250 | 0,017 | 0,005 | 0,012 | 0,009 | 0,241 |
| 0,030 | 0,080 | 0,060 | 0,020 | 0,015 | 0,015 |

Тут прийняті реальні величини абсолютного вмісту кисню і його зміни при порційному вакуумуванні при різному вмісті вуглецю. За цими змінами розраховані величини зниження вмісту вуглецю в результаті взаємодії його з киснем відповідно співвідношенню [С, %] / [O, %] = 12/16.

Як видно з наведеного прикладу, при вмісті вуглецю 0,25 % зниження його на 0,009 % [3,6 % (відн.)] не має істотного значення, хоча й повинно іноді враховуватися. Зниження вмісту вуглецю з 0,030 на 0,015 % вже становить 50 %, тобто досить суттєво. Таким чином, порційне вакуумування в результаті вуглецевого розкислення дозволяє отримувати сталь з особливо низьким вмістом вуглецю (<0,01 %), що має важливе значення при виробництві сталі, в якій вуглець є шкідливою домішкою навіть при такому низькому вмісті.

У процесі порційного вакуумування зі сталі інтенсивно видаляється водень. За 40–45 циклів (коефіцієнт рециркуляції більше 4) при залишковому тиску в камері наприкінці обробки 0,07–0,15 кПа його вміст знижується до (1,5–1,8)·10-4 % (рис. [4.10](#_bookmark61)). Як і при інших способах вакуумної обробки, інтенсивніше і повніше водень видаляється при вакуумуванні нерозкисленої

сталі, коли він екстрагується бульбашками монооксиду вуглецю, що утворюється. Однак при порційному вакуумуванні ця різниця несуттєва внаслідок розбризкування металу у вакуум-камері та інтенсивного перемішування. До того ж, на відміну, наприклад, від струменевого вакуумування, що застосовується для видалення зі сталі водню, можна збільшити час порційної обробки і довести вміст водню до допустимого рівня.

 Зазвичай для отримання в сталі вмісту водню та видалення (1,5-2,0)\*10-4 % її імунітету до утворення флокенів в процесі вакуумування при 0,07–0,14 кПа потрібна 3–4-кратна рециркуляція металу через вакуум-камеру нерозкисленої сталі і 4–5-кратна рециркуляція повністю розкисленої сталі.



1 – нерозкислена сталь; 2 – сталь, розкислена алюмінієм

Рисунок 7.5 – Зміна вмісту водню в процесі порційного вакуумування сталі в 250-т ковші

Інтенсивне перемішування металу при потраплянні в вакуум-камеру і назад в ківш створює й інші переваги порційного вакуумування в порівнянні зі способами, описаними вище.

У процесі вакуумування в метал можна вводити значну кількість феросплавів через спеціальний завантажувальний патрубок зі шлюзом, здійснюючи легування і розкислення. При цьому суттєво зменшується вигар легуючих елементів і розкислювачів. Засвоєння елементів збільшується і приблизно становить: кремнію і марганцю 95 %, алюмінію 80 %, титану 70 %, хрому – до 100 %. Малий вигар і сприятливі умови контролю дозволяють

одержувати сталь з вузькими межами коливань вмісту елементів: вуглець

±0,015 %, марганець ±0,050 %, алюміній ±0,005 %, титан ±0,015 %, ванадій

±0,010 %.

Незважаючи на простоту загальної схеми, промислові установки порційного вакуумування представляють собою складні споруди. Вони складаються з комплексу пристроїв, що забезпечують опускання і підйом вакуум-камери або ковша, системи вакуум-проводів з шарнірними з'єднаннями, пристрою для автоматичного зважування та завантаження у вакуум-камеру розкислювачів і легуючих матеріалів, а також пристроїв, що забезпечують нагрів вакуум-камери, охолодження відсмоктуваних газів та інші функції.

Оскільки сталь обробляють окремими порціями, маса металу в ковші при порційному вакуумуванні практично не обмежується. При цьому можна використовувати вакуумні насоси невеликої продуктивності.

Важливим питанням роботи порційних вакууматорів є вибір вогнетривкої футерівки вакуум-камери. Це зумовлено складними умовами служби цієї футеровки, що зазнає хімічний вплив металу, зокрема дуже активного при розрідженні розчиненого в сталі вуглецю, ерозійний знос рухомого металу, а також термічні удари. Зазвичай для футеровки вакуум-камери застосовують муллітові і магнезітохромітові вогнетриви. Стійкість футерівки вакуум-камер становить 600–800 плавок, а стійкість патрубків в два рази менше.

## Циркуляційне вакуумування

Іншим способом обробки рідкої сталі у вакуумі малими порціями є циркуляційне вакуумування, розроблене в 1959 р. фірмами Ruhrstahl і Heraeus (Німеччина) і по початковим буквам цих фірм назване процесом RH.

Схема установки циркуляційного вакуумування наведена на рис. 7.6. Вакуум-камера, футерована вогнетривкими матеріалами, має два патрубки, які занурюються в метал, що знаходиться в ковші. При створенні вакууму метал підіймається по цих патрубках в камеру, після чого в підйомний патрубок подають аргон, що грає роль транспортуючого газу. Виникає інтенсивний рух

металу в підйомному патрубку і відповідно, через камеру, в зливному патрубку. Він викликаний тим, що аргон при входженні до підйомного патрубку утворює з металом газометалічну піну. Об'єм цієї піни сильно збільшується внаслідок розширення газу при його нагріванні до температури рідкого металу. У цій піні на одну частину металу (за об'ємом) припадає більше десяти частин газу. Маючи в порівнянні з металом дуже малу щільність, газометалічна піна швидко підіймається в підйомному патрубку, відтак переміщаючи сталь в вакуум- камеру. Пройшовши вакуум-камеру, сталь з тією ж самою масовою швидкістю, що і в підйомному патрубку, надходить в ківш через зливний патрубок. Таким чином, відбувається циркуляція рідкої сталі.



а – ківш с металом; б – вакууматор; 1 – підйомний патрубок;

1. – зливний патрубок; 3 – нижня знімна частина; 4 – завантажувальний патрубок; 5 – вакуум-провід; 6 – отвір для пальника

Рисунок 7.6 – Схема установки циркуляційного вакуумування та устрій вакууматора

Швидкість руху металу в підйомному патрубку залежить від питомої витрати транспортуючого газу – аргону, тобто витрати його на одиницю площі поперечного перетину цього патрубка. При збільшенні питомої витрати аргону з 1,2·10-2 до 2,4·10-2 м3/(см2·год) швидкість циркуляції металу в підйомному патрубку збільшується 0,4–0,7 до 0,8–1,4 м/с. Подальше збільшення витрати транспортуючого газу до (3,0–3,6)·10-2 м3/(см2·год) не викликає істотного підвищення швидкості циркуляції рідкого металу.

Наявність деякого оптимального значення питомої витрати транспортуючого газу, вище якого його витрата не чинить істотного впливу на швидкість циркуляції рідкої сталі, обумовлена тим, що при великій витраті аргону збільшуються втрати енергії на тертя сталі об стінки підйомного патрубка і пов'язаного з цим збільшенням турбулентності потоку.

Інтенсивний рух металу через вакуум-камеру викликає виникнення в ній потужних турбулентних пульсацій, що прискорює масообмінні процеси і, відтак, фізико-хімічні процеси у ванні. Цьому сприяє наявність у ванні великої кількості бульбашок аргону, що виключає необхідність зародження нової газової фази. Під час циркуляції відбувається фонтанування та розбризкування металу у вакуум-камері. Над підйомним патрубком висота польоту бризок досягає 5–10 м. Такі викиди крапель металу в робочий простір вакууматора сприяють розвитку процесів вуглецевого розкислення і дегазації сталі.

Іншою важливою обставиною, що прискорює розвиток процесів вуглецевого розкислення і дегазації, є збільшення поверхні металевої фази. При циркуляційному вакуумуванні масообмін відбувається на поверхні 17–100 м2. Ця величина може бути ще більше зі збільшенням кількості транспортуючого газу, а також газів, що виділяються із сталі в процесі вакуумування.

Випливаючи зі зливного патрубка з великим динамічним напором, струмінь металу інтенсивно перемішує всю масу рідкої сталі в ковші і забезпечує однорідність складу металу. Швидкість руху металу в ковші і коефіцієнт масопереносу збільшуються зі збільшенням витрати аргону і діаметра підйомного патрубка. Одночасно збільшується швидкість циркуляції сталі (рис. 7.7). Це є ефективним засобом інтенсифікації процесу і збільшення маси сталі, що обробляється в циркуляційному вакууматорі.

Рисунок 7.7 – Залежність швидкості циркуляції металу при обробці сталі в 250-т ковші від витрати аргону і діаметра підйомного патрубка *d*

При збільшенні маси металу в ковші від 40 до 400 т діаметр підйомного патрубка збільшують з 20 до 60–70 см. Одночасно збільшують витрату аргону з 24 до 72 м3/год. Це, однак, вимагає збільшення потужності вакуумних насосів для підтримання досить низького тиску у вакуум-камері (~60–100 Па), що обмежує можливість збільшення діаметра патрубка і швидкості циркуляції.

Характерні для циркуляційного вакуумування зміни витрати аргону і тиску в вакуум-камерах показані на рис. 7.8, а. Вони отримані за результатами контролю ходу процесу при масі металу в ковші 260 т, внутрішньому діаметрі вакууматора 2000 мм і внутрішньому діаметрі кожного з патрубків 600 мм. На рис. 7.8, б показана зміна концентрацій вуглецю і кисню в металі по ходу вакуумування цієї ж плавки.

Як видно, окислення вуглецю і, відповідно, вуглецеве розкислювання починається через деякий час, протягом якого тиск знижується приблизно до 6,5–7,0 кПа. Далі при швидкому зниженні тиску до 0,6–0,7 кПа протягом близько 5 хв вміст розчиненого в сталі кисню знижується до мінімуму, що відповідає 0,002–0,004 %. Процес вуглецевого розкислення завершується через 10 хв від початку циркуляційного вакуумування. При цьому коефіцієнт рециркуляції досягає 3,5–4,0.

 

а) б)

Рисунок 7.8 – Зміна витрати аргону і тиску у вакуум-камері (а), концентрацій вуглецю і кисню в металі (б) по ходу циркуляційного вакуумування

В процесі вакуумної обробки спостерігається зниження і загального вмісту кисню, причому відбувається воно в значній мірі після стабілізації вмісту розчиненого кисню на мінімальному рівні (рис. 7.9). Це свідчить про те, що при циркуляційному вакуумуванні відбувається видалення зі сталі оксидних неметалічних включень. Таке видалення і, як видно, дуже швидке, обумовлено інтенсивним рухом металу при його циркуляції. Таким чином, створюються сприятливі умови виносу неметалічних включень до поверхні розділу шлак- метал в ковші і переходу їх до шлаку. Істотне значення може мати й укрупнення включень при їх зіткненнях і коалесценції (злитті) рідких частинок або коагуляції твердих частинок. Утворені великі, особливо в результаті коалесценції, частинки можуть швидко видалятися зі сталі внаслідок спливання.

Видалення неметалічних включень до мінімуму в процесі обробки завершується пізніше, ніж вуглецеве розкислення. Тому циркуляційне вакуумування частково або повністю розкисленої сталі з метою видалення оксидних неметалічних включень вимагає витрат значного часу на обробку (15–25 хв) і багаторазового проходження металу через вакууматор (коефіцієнт рециркуляції 4–5).



Рисунок 7.9 – Зміна тиску і вмісту загального і розчиненого в сталі кисню по ходу циркуляційного вакуумування сталі (0,38 % C; 0,11 % Si; 0,65 % Mn; 0,003 % А1) в 150-т ковші

Швидкість і ступінь вуглецевого розкислення в певній мірі залежать від відносної кількості газоподібної фази в газометалічній піні, що надходить у вакуум-камеру, і інтенсивності перемішування. Остання впливає на швидкість і ступінь видалення неметалічних включень із сталі. Зі збільшенням витрати аргону і діаметра підйомного патрубка, що викликає підвищення швидкості руху металу, видалення кисню з розчину і у вигляді включень відбувається швидче і до більш низького вмісту.

Вуглецеве розкислення при циркуляційному вакуумуванні має велике значення при обробці сталі з вмістом вуглецю 0,2 % і більше, тобто коли вміст вуглецю значно більше вмісту кисню і його досить для глибокого розкислення ([О] < 0,004 %). При цьому сталь виходить вельми чистою по оксидним неметалевим включенням, особливо великим.

Зниження вмісту вуглецю в сталі в результаті його взаємодії з розчиненим в сталі киснем при порційній вакуумній обробці і при циркуляційному вакуумуванні має суттєве значення при виробництві сталі з особливо низьким вмістом вуглецю (< 0,004 %). Циркуляційне вакуумування, при якому в метал вводиться величезна кількість бульбашок транспортуючого газу, що служать готовими центрами розвитку реакції з утворенням газу СО, є ідеальним способом отримання такої сталі.

У процесі циркуляційного вакуумування відбувається інтенсивне видалення водню зі сталі (рис. 7.10). Цьому сприяє велика поверхня контакту металу з розрідженою газовою фазою внаслідок спливання в ньому великої кількості бульбашок транспортуючого газу і фонтанування металу з викидами значної його частини у вигляді крапель в розріджений простір вакуум-камери. У разі окислення вуглецю через утворення CO кількість газових бульбашок, які пронизують метал під час вакуумної обробки, збільшується, що сприяє більш інтенсивному і більш повному видаленню водню. Тому при циркуляційному вакуумуванні неокисленої сталі можна протягом більш короткої обробки отримати менший вміст водню в металі. Для отримання вмісту водню в сталі менше 2·10-4 %, що забезпечує імунітет до утворення флокенів, зазвичай при обробці нерозкисленої сталі потрібно циркуляційне вакуумування з коефіцієнтом рециркуляції 3–4.

В умовах інтенсивного перемішування металу при циркуляційному вакуумуванні можливе введення в сталь значної кількості феросплавів, що обмежується лише її охолодженням. Це дозволяє проводити розкислення і легування наприкінці вакуумування. Феросплави та легуючі вводять через спеціальний патрубок-шлюз у вакуум-камері. Перед вакуумуванням вакуум- камеру нагрівають до 1300–1450 °С. За час вакуумування і в результаті введення феросплавів температура знижується на 30–50 °С, що вимагає перегріву сталі в печі.

По ефективності вакуумування циркуляційне вакуумування майже не відрізняється від порційного. Користуючись ним, можна проводити глибоке зневуглецювання (< 0,010–0,005 % [С]), розкислення (< 0,005–0,003 % [О]), отримувати метал з низьким вмістом оксидних включень сприятливого типу і низький вміст водню (< 2·10-4 %).



Рисунок 7.10 – Зміна вмісту водню в металі в процесі циркуляційного вакуумування розкисленої (1) і нерозкисленої (2) сталі

Вакуумна камера для циркуляційного вакуумування (див. рис. 7.6) являє собою витягнутий циліндр, що складається двох частин, з'єднаних фланцями. Кладка нижньої частини, в якій в процесі вакуумної обробки циркулює метал, піддається інтенсивному зносу і вимагає більш частої зміни, ніж кладка верхної частині. Тому нижня частина, що займає приблизно 1/3 висоти внутрішнього об'єму камери, робиться знімною.

Підйомний і зливний патрубки прикріплюються до вакуум-камери фланцями і розташовуються паралельно. Зазвичай вони мають однаковий діаметр.

Стійкість верхньої частини циліндричної частини камери досягає 3–4 тисяч плавок, верхньої конічної – до 2 тисяч. Стійкість нижньої циліндричної частини - до 1 тисячі плавок, а подини в 3–4 рази менше. Стійкість футеровки в підйомному патрубку 80–150 плавок, а в зливному – в 1,5–2 рази більше.