

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОДЗЕРЖИНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

С.П.Пантейков

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни “Техніка високотемпературного експерименту”
освітньо-наукової програми вищої освіти
(підготовка докторів філософії)
зі спеціальності 136 “Металургія”

ЗАТВЕРДЖЕНО:

редакційно-видавничою секцією
науково-методичної ради ДДТУ,
від _____ 2016 р., протокол № ____

м. Кам'янське

2016

Розповсюдження і тиражування без офіційного дозволу Дніпродзержинського державного технічного університету заборонено.

Конспект лекцій з дисципліни “Техніка високотемпературного експерименту” освітньо-наукової програми вищої освіти (підготовка докторів філософії) зі спеціальності 136 “Металургія” / Укладач: Пантейков С.П.- Кам’янське: ДДТУ, 2016.- 54 с.

Укладач: канд. техн. наук, доцент Пантейков С.П.

Відповідальний за випуск: д-р техн. наук, професор Сігарьов Є.М.

Рецензент: канд. техн. наук, доцент Єрмоменко А.П.

Затверджено на засіданні кафедри металургії чорних металів

Протокол № 14 від 29 серпня 2016 р.

Коротка анотація видання. У конспекті лекцій наведені основні види досліджень у металургії, методи моделювання та устаткування для проведення лабораторних експериментів, типи нагрівальних пристроїв, методи виміру температури, типи основного високотемпературного лабораторного устаткування.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. ОСНОВНІ ВИДИ ДОСЛІДЖЕНЬ В МЕТАЛУРГІЇ.....	4
2. ЛАБОРАТОРНІ І НАПІВПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	7
2.1. Основні задачі лабораторних досліджень.....	7
2.2. Основи теорії вимірювань.....	7
3. ОСНОВНЕ ЛАБОРАТОРНЕ УСТАТКУВАННЯ.....	10
4. ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	12
5. ОСНОВНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ФИЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИН.....	14
6. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДНОВНИХ ПРОЦЕСІВ.....	17
7. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОКИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ.....	19
8. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ.....	21
8.1. Методи експериментального дослідження полів температури.....	23
8.2. Вимірювання температури твердих тіл.....	24
9. ТИСК.....	25
9.1. Вимірювання тиску.....	27
9.2. Рідинні прилади тиску.....	27
9.3. Зондові методи вимірювання полів тиску в потоках рідини і газу.....	31
10. НАПІВПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	31
11. ПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	33
12. В'ЯЗКІСТЬ ШЛАКІВ.....	35
13. ГАРЯЧЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	38
14. ОБ'ЄКТИ І МЕТОДИ КОНТРОЛЮ В ХОДІ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОЦЕСУ....	44
14.1. Контроль хімічного складу матеріалів.....	45
14.2. Способи вимірювання температури розплавів і футеровки сталеплавильних агрегатів.....	46
14.2.1. Вимір температури рідкої сталі.....	48
14.2.2. Безперервний вимір температури.....	49
14.2.3. Візуальне визначення температури металу.....	49
14.2.4. Вимірювання температури футеровки сталеплавильних агрегатів термопарами, радіаційними пірометрами, шомпольними термозондами...50	50
15. Контрольно-вимірювальні прилади і апаратура.....	51
Контрольні питання.....	51
Основна література.....	52
Додаткова література.....	52
Перелік навчальних та інших посібників, методичних вказівок та технічних засобів.....	53

ВСТУП

Для сучасної металургії характерно значна увага до запитань підвищення якості сталей та сплавів, а також ефективності виробництва, що стало можливим завдяки значно збільшеному рівню наукових досліджень. Сьогоднішнє положення в теоретичній металургії показалося фантастичним вченим 19 століття, як за обсягом виконуваних науково-дослідних робіт, так і за рівнем їх технічної оснащеності. Значно ускладнилася техніка експериментальних робіт, поліпшилось забезпечення лабораторій складним вітчизняним та закордонним науковим обладнанням, піднялася роль математичної обробки результатів. У зв'язку із цим стала більш складна робота дослідника, яка потребує широкої підготовки в різних областях знань і, в першу чергу, в області теоретичної металургії.

В початкових планах металургійних спеціальностей університетів України присутні дисципліни, що освітлюють питання організації та проведення фізико-хімічних досліджень металургійних процесів. Крім обов'язкових лекційних курсів, широкий розвиток в останні роки отримала самостійна наукова робота студентів, що проводиться на кафедрах, в галузевих та виробничих лабораторіях.

1. ОСНОВНІ ВИДИ ДОСЛІДЖЕНЬ В МЕТАЛУРГІЇ

По характеру поставленої мети, вирішуваних задач і вживаних методи наукових досліджень можуть бути розділені на наступні види.

Аналіз наукової інформації, що міститься в літературі, патентній документації, дисертаціях, звітах про НДР і т.д., проводиться з метою визначення можливих напрямів і конкретних методів дослідження, а також поглиблення знань з питання, що вивчається. При виконанні практично всіх досліджень складається огляд літератури.

Теоретичні дослідження і узагальнення виконують для визначення принципових можливостей вибраного напрямку шляхом аналізу наперед відомих закономірностей, при аналізі результатів проведених експериментів, підготовці попередньої гіпотези, підведенні підсумків закінченого дослідження і розробці нових теоретичних положень.

Лабораторні дослідження проводять з метою вивчення властивостей речовин, матеріалів і закономірностей металургійних процесів. Ця мета багато в чому визначається розмірами устаткування. При достатній

потужності за допомогою лабораторних установок можна розробляти або уточнювати окремі елементи технології металургійних процесів і навіть створювати нові технологічні процеси.

Напівпромислові або досвідчено-промислові дослідження проводяться на досвідченому устаткуванні, що має більші розміри, ніж лабораторні установки, і включаючому всі головні елементи промислових агрегатів, або на промислових установках, спеціально виділених або споруджених для вирішення дослідницьких задач. Основна мета таких досліджень – створіння нових технологічних процесів, уточнення елементів технології, розробка або вдосконалення конструкцій вузлів або агрегатів.

Дослідження на промислових агрегатах виконують для вдосконалення технологічних процесів і устаткування з метою підвищення продуктивності і поліпшення якості продукції. Особливість проведення більшості промислових досліджень полягає в тому, що вони здійснюються на агрегатах, що випускають товарну продукцію, а це ускладнює виконання виробничого плану. Принципово нова технологія розробляється безпосередньо на діючих промислових установках тільки тоді, коли немає сумніву в тому, що її упровадження дозволить збільшити об'єм і підвищити якість продукції, що випускається.

Наймасштабніші розробки нових технологічних процесів проводяться з використанням всіх вказаних видів дослідження. Тоді дослідження включає такі етапи:

1. *Визначення мети і можливих шляхів її досягнення. Розробка технічного завдання, плану і програми досліджень.*
2. *Попередній аналіз наявної наукової інформації. Встановлення характеру вирішуваних задач.*
3. *Спорудження лабораторної установки і проведення на ній досліджень.*
4. *Аналіз даних лабораторних досліджень і додаткової наукової інформації, розробка робочої гіпотези і вибір технічних рішень для будівництва напівпромислової або досвідчено-промислової установки.*
5. *Споруда досвідчено-промислової або напівпромислової установки і проведення на ній досліджень.*
6. *Узагальнення даних досвідчено-промислових або напівпромислових досліджень, уточнення розроблених раніше теоретичних положень і знаходження основних теоретичних рішень для будівництва промислових установок і цехів.*
7. *Будівництво промислових установок, цехів, відробіток технології процесу і доробка конструкцій устаткування.*

8. *Розробка остаточної теорії питання або її уточнення.*

9. *Удосконалення технології процесу, конструкцій агрегатів і устаткування з метою підвищення їх продуктивності і поліпшення якості продукції на основі розробленої теорії.*

Після закінчення кожного етапу уточнюються зміст робіт, план і програма наступного етапу. Так, наприклад, розроблялися технології киснево-конвертерного процесу, безперервного розливання сталі, виробництва окатишів. Нерідко науковці виконують тільки окремі етапи загального дослідження. В таких випадках вживані види дослідження залежать від приватної мети і задач. Якщо в обмежений термін виконується складна і трудомістка НДР, можна проводити одночасно декілька етапів. При цьому від керівника роботи потрібна ретельна її координація для забезпечення взаємозв'язку етапів.

Вибір видів досліджень залежить від цілого ряду об'єктивних і суб'єктивних чинників, найголовнішими з яких є наступні.

Мета і задачі дослідження. Наприклад, щоб вибрати склад шлаку з необхідними властивостями, достатньо здійснити теоретичні і лабораторні дослідження і узагальнити їх результати. Якщо потрібно перевірити ці шлаки в певних технологічних умовах, то проводять і промислові випробування.

Наявність кадрів відповідної кваліфікації. Цей чинник має істотне значення при проведенні глибоких теоретичних досліджень, математичному моделюванні, роботі на складному устаткуванні.

Наявність необхідного устаткування є обов'язковою передумовою проведення лабораторних або досвідчено-промислових досліджень.

Об'єм фінансування визначає чисельність наукового персоналу, можливості придбання устаткування і матеріалів, що привертається, оплату послуг сторонніх організацій.

Терміни проведення досліджень. При обмежених термінах іноді доводиться відмовлятися від деяких видів досліджень, пов'язаних з великими витратами часу. Співвідношення різних видів робіт залежить від загальної спрямованості дослідження (теоретичне або прикладне). Після встановлення основних видів робіт вибирають конкретні методи виконання окремих етапів дослідження.

2. ЛАБОРАТОРНІ І НАПІВПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Основні задачі лабораторних досліджень

Деякі задачі дослідження в металургії можуть бути вирішені за допомогою лабораторних експериментів; їх дані володіють великою універсальністю і використовуються при аналізі самих різних технологічних процесів, хоча в лабораторії неможливо відтворити і врахувати весь комплекс чинників, діючих в промислових умовах. Звичайно такі дослідження проводяться по спрощених моделях технологічних процесів, і тому на їх підставі важко кількісно передбачити кінцевий результат виробничого процесу в цілому. Проте вони дозволяють створити якісну картину роботи агрегату і кількісно оцінити окремі елементи технології.

При дослідженні металургійних процесів в лабораторних умовах розв'язуються такі задачі: визначаються фізико-хімічні властивості розплавів (густина, в'язкість, поверхневе натягнення, електропровідність металу і шлаку), теплові характеристики різних матеріалів (питома теплоємність, теплопровідність і т.д.), термодинамічні і кінетичні характеристики окислювально-відновних процесів, що протікають в металургійних агрегатах, а також активності елементів в металі і різних з'єднань в шлаку; моделюються технологічні процеси і окремі елементи технології на базі теорії подібності; розробляються основи нових технологічних процесів і прийомів, методи контролю і управління з подальшою їх перевіркою на крупних лабораторних установках. Це дозволяє оптимально використовувати матеріальні засоби, запобігти непродуктивним витратам на споруду непрацездатних агрегатів і механізмів.

2.2. Основи теорії вимірювань

При проведенні досліджень зведення про хід процесів і стан агрегату або установки одержують шляхом вимірювань.

Вимірюванням називається знаходження за допомогою технічних засобів значень деякої фізичної величини. Величина, що вимірюється, порівнюється з одиницею цієї величини, результат множення якої на відвернуте число є знайденим значенням фізичної величини і служить кількісною інформацією про досліджуваний об'єкт.

В металургійних дослідженнях визначувані величини частіше за все вимірюють за допомогою різних електричних засобів. Вони забезпечують можливість отримання необхідних даних на відстані, в

малодоступних місцях; дистанційну передачу інформації; використання автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП); володіють високою чутливістю апаратури, малою інерційністю, широким діапазоном вимірювань і іншими достоїнствами. Об'єктом вимірювання служить складний процес, параметри якого в реальних умовах звичайно взаємозв'язані. Зі всього різноманіття фізичних величин, що характеризують його, вибирається окремий параметр, який називається величиною, що вимірюється.

Вимірювальний прилад включає три основні вузли, які можуть розміщуватися окремо один від одного і з'єднуватися кабелем. Перший з них, датчик, розміщується безпосередньо на об'єкті вимірювання. Датчики можуть бути контактний (дотичні з об'єктом, що вимірюється) і безконтактний. При тривалій експлуатації в умовах агресивних середовищ і високих температур більш надійні безконтактні датчики, проте у багатьох випадках вони дають великі погрішності, що обмежує їх застосування. Другий основний вузол приладу — вимірювальний пристрій, який може бути конструктивно відособлено і розміщується на деякій відстані від об'єкту, що вимірюється. Третій вузол — показчик інформації або результату вимірювання. Він вмонтовується разом з вимірювальним пристроєм або розміщується до ладу від нього в місці, відведеному для контролю за процесом. Основними характеристиками приладу є чутливість і точність. Чутливість — розмірна величина, рівна приросту параметра, що вимірюється, що викликає зміну свідчень приладу. Точність — характеристика якості вимірювань, близькість, що відображає, до ну погрішностей їх результатів.

Погрішність вимірювання – характеристика його результатів, є відхиленням знайденого значення величини від її істинного значення. Розрізняють абсолютну погрішність, виражену в одиницях величини, що вимірюється, і відносну погрішність, що є відношенням абсолютної погрішності до істинного значення звіряємої величини (в частках одиниці, у відсотках, промілле. і т. п.):

$$\delta = \frac{|a - \bar{a}|}{\bar{a}},$$

де δ — відносна погрішність вимірювання; a — знайдене значення величини, що вимірюється; \bar{a} — істинне значення величини. Прояв погрішностей вимірювань і приладів надзвичайно різноманітно, що викликає необхідність класифікувати їх по ряду ознак.

Інструментальні погрішності пов'язані з недосконалістю вимірювальних приладів і в першу чергу – датчиків. Вони виникають

при поганій налазці приладів або незадовільному догляді за ними.

Методичні погрішності пов'язані з недоліками методу вимірювання. Причина їх виникнення полягає в тому, що виміряють не потрібну величину, а комплекс величин, куди входить і параметр (звичайно як основна складова), що вимірюється, або величину, яка приблизно відображає потрібний параметр. Частіше за все це роблять, щоб спростити вимірювання.

Систематичні погрішності – помилки, які не змінюються в часі. Причинами їх є неточності градування, зсув нуля приладу або зсув датчика, а також постійне відхилення від нормальних умов експлуатації засобів вимірювань. Систематична помилка важко виявляється, і тому при повторних дослідах помилка повторюється. Систематичні погрішності можуть бути повністю усунені введенням відповідних поправок (коректування нуля приладу, умов проведення експерименту і т.д.).

Прогресуючі погрішності поволі змінюються з часом і обумовлені старінням апаратури, приладів, зміною властивостей датчиків в ході експлуатації. Прогресуючі погрішності можуть бути скоректовані введенням поправки лише на даний момент часу на відміну від систематичних погрішностей, які можна скоректувати один раз на весь час роботи системи. Тому поправки на прогресуючі погрішності вимагається вводити періодично і притому тим частіше, чим важливіше виключити їх вплив.

Випадковими погрішностями називаються невизначені по величині або недостатньо вивчені погрішності, в появі яких не вдається встановити якої-небудь закономірності. Випадкові погрішності виявляються у вигляді деякого розкиду даних при повторенні аналогічних дослідів. В переважній більшості випадкові помилки підкоряються нормальному закону розподілу, вірогідність їх появи і величина можуть бути визначені за допомогою теорії вірогідності. Вплив випадкових помилок на результат експерименту може бути врахований за допомогою математичних методів обробки результатів. Складові погрішності реальних вимірювальних систем виявляються в основному як випадкові. Розділення погрішностей на систематичні, прогресуючі і випадкові — лише зручний прийом їх аналізу. Слід враховувати, що погрішності, обумовлені одними і тими ж чинниками, в одній серії експериментів можуть бути систематичними, а в іншій – випадковими.

Наявність погрішностей вимірювань веде до того, що в ході кожного досвіду одержують не істинний результат, а деякий наближений до нього. Інакше кажучи, фізичну величину виміряють з обмеженим ступенем

точності, залежної від сумарної погрішності. Чим вище точність вимірювання, тим ближче до істинного значення величина, що вимірюється.

Погрішності в різних елементах вимірювальних систем встановлюються при багатократній перевірці приладу і є розкидом крапок щодо якоїсь середньої. Характеристики однотипних приладів і датчиків, що випускаються серійно, мають індивідуальні особливості. Тому для підвищення точності вимірювань в лабораторних умовах бажано перевірити градування датчиків і вимірювальних приладів, порівнявши їх свідчення з свідченнями відповідних еталонних приладів або приладів більш високого класу точності. Це питання заслуговує серйозної уваги при виборі методики дослідження, оскільки підвищення точності еквівалентно збільшенню кількості експериментів, що проводяться. В той же час слід враховувати, що для підвищення точності необхідно ускладнювати вимірювальні системи, а це може привести до зниження їх надійності. У ряді випадків необхідно провести більше дослідів, використовуючи менш точну, але більш просту апаратуру, ніж застосовувати високоточні системи.

3. ОСНОВНЕ ЛАБОРАТОРНЕ УСТАТКУВАННЯ

Для виконання лабораторних досліджень потрібні різноманітні прилади і устаткування, у тому числі плавильні і нагрівальні установки, засоби для вимірювання і регулювання температури і інших величин, калориметри, вакуумні пристрої, апарати для отримання газових середовищ, ваговимірювальна і дозуюча техніка, різні моделі, прилади для аналізу і ін.

Для проведення більшості лабораторних металургійних досліджень необхідні в першу чергу високотемпературні установки, в яких здійснюються нагрів і плавлення металів. З них найпростішими є полум'яні печі, в робочому просторі яких при використуванні кисню можна отримати температуру до 2000°C. Проте їм властиві такі недоліки, як трудність регулювання окислювального потенціалу газової фази, нерівномірність розподілу температури в об'ємі печі, складність підтримки температурного режиму, тому їх недоцільно застосовувати для точних експериментів.

Велике розповсюдження в практиці лабораторного експерименту отримали печі опору, температура в робочому просторі яких може досягати 2500°C, температурний режим легко регулюється. Як нагрівачі використовують різні метали і неметалічні матеріали.

Нагрівачі з платини, сплавів платини з родієм можуть працювати

в окислювальній атмосфері, вони забезпечують робочі температури до 1600°C. Нагрівачі з танталу, молібдену, вольфраму дозволяють одержувати температури 2000, 2100, 2500°C і можуть тривалий час працювати в нейтральній, відновній атмосфері або у вакуумі. Металеві нагрівачі мають форму дроту, прутків, пластин. Для захисту від окислення їх обмазують сумішами, що не містять оксидів заліза і кремнезему.

З неметалічних нагрівачів поширені стрижні сілітові і з дисиліцида молібдену, графітні. Останні дозволяють отримати в робочому просторі температури до 2500 °С. Графітовий нагрівач — трубу діаметром 50—100 мм і завдовжки 300—350 мм — має, зокрема, пекти Таммана. Торці труби кріпляться в мідних або латунних водоохолоджуваних зе'мниках . Навкруги неї засинають криптол. Простір між корпусом печі і нагрівачем теплоізолювано. В печі Таммана за рахунок окислення вуглецю нагрівача створюється відновна атмосфера. При роботі в окислювальних середовищах для захисту від їх дії нагрівач покривають обмазкою, встановлюють усередині нього алундову трубу, подають в піч нейтральні гази і ін.

Для плавлення металу в кислих або основних тиглях місткістю до 100 кг використовують високочастотні індукційні печі, що працюють при частоті до 10 000 Гц. Індуктор печі виготовляють з мідної трубки, по якій циркулює вода. Шлакообразующие матеріали розплавляють на поверхні рідкого металу. Існують індукційні печі без футеровки, в яких метал плавиться в зваженому стані. Індуктор у вигляді кільця або спіралі, що харчується від високочастотного генератора, створює магнітне поле у формі «кошика», в якому підвішується зразок, що розплавляється, масою 0,1—30гр. Гідність методу —отсутствие контакту металу з футеровкой. В лабораторній практиці часто використовують також дугові печі з різною потужністю трансформатора.

Поширеними датчиками для вимірювання температури робочих середовищ є термопари. Платинова термопара має найстабільнішу характеристику і вважається еталонною. Вона може тривало працювати при температурах до 1300°C і короткочасно до 1600°C. Термопари на основі сплавів платини з родієм придатні для вимірів температури до 1800°C. Стабільною характеристику мають вольфрам-ренієві термопари, якими можна користуватися в області температур до 2000°C. Для низькотемпературних вимірювань застосовують хромель-копелєві (до 600°C) і хромель-алюмелєві (до 1300°C) термопари. Термопари використовуються в комплекті з вимірювальними приладами, найпростішими з яких є міллівольтметри. Звичайно застосовуються

електронні (ЕПП, ПСР, КСП і ін.) або переносні потенціометри (1111-63) та ін.

Для безконтактного вимірювання температури використовують пірометри: оптичні (ЕОП і ОП), фотоелектричні (ФЕП-3, ФЕП-4), радіаційні (ТЕРА-50), колірні (ЦЕП-3М, ЦЕП-4). Недолік цього методу полягає в тому, що свідчення приладу залежать від прозорості середовища, через яке проводиться вимір, ступені чорноти поверхні, наявність шлакових плівок на поверхні металу і т.д.

Для фізичного моделювання технологічних процесів використовують різні пристосування. При моделюванні на рідкому металі агрегат імітують вогнетривким тиглем. Одна із стінок тигля може бути зроблений з кварцового скла, що дозволяє спостерігати за процесами в тиглі, вести фото- і кінозйомку.

4. ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

До основних переваг лабораторного дослідження відносяться: можливість проведення «чистого досвіду», тобто дослідження впливу якогось одного чинника при постійності інших, і простота математичного планування експерименту. В цьому випадку забезпечується максимальний ефект при мінімальних матеріальних витратах, що робить лабораторний експеримент важливим і необхідним етапом проведення НДР.

В лабораторних дослідженнях як робочі середовища застосовують або промислові, або синтетичні матеріали. Наприклад, синтетичний шлак потрібного складу одержують шляхом сплаву чистих оксидів. Гідністю синтетичних матеріалів є те, що при їх використуванні можна строго контролювати і змінювати їх склад в широкому діапазоні. Промислові матеріали дозволяють максимально наблизитися до умов виробничої технології.

Як газові середовища використовують N_2 , водяна пара, Z , CO_2 , повітря, технічно чистий кисень, аргон, а також їх суміші. При моделюванні робочі середовища вибирають відповідно до умов вирішуваної задачі і вживана методика. Тут можуть використовуватися як рідкі метал і шлак («гаряче моделювання»), так і інші рідини — вода, ртуть, парафін, органічні рідини, електроліти і водні розчини («холодне моделювання»).

Для роботи з рідкими металом і шлаками застосовуються різні вогнетривкі матеріали, які повинні володіти достатніми термостійкістю,

хімічною інертністю до робочих середовищ і т.д. Metали плавлять в керамічних тиглях з кварцу, алунда, магнезиту, циркону, нитрида бору і ін. Розплавлені основні шлаки, особливо оксиди заліза, що містять, дуже агресивні по відношенню до кераміки, тому при роботі з ними необхідно використовувати тиглі з платини, сплавів платини з родієм, молібдену, які володіють достатньою стійкістю. Для кислих шлаків можна застосовувати тиглі з кварцу, циркону або оксиду торія. Спай термопар, що знаходиться в рідкому металі або шлаку, захищають вогнетривким наконечником.

Лабораторний експеримент характеризується невеликою масою матеріалів, що використовуються в дослідках. Тому дуже важливе питання про відбір проб рідких середовищ для контролю процесу. У ряді випадків визначають склад тільки висхідного матеріалу і кінцевого продукту. Для відбору проб з тигля метал і шлак наморожують на металевий стрижень або засмоктують в кварцову трубочку.

Термопару для контролю температури встановлюють всередині або зовні тигля. В останньому випадку вимірювання ведеться з систематичною помилкою, на величину якої вводять поправку. Враховуючи теплову інерцію захисного чохла, при разовому вимірі температури термопару слід витримувати до тих пір, поки стрілка приладу не встановиться нерухомо. Найточніші результати вимірювання одержують «голим спаєм», але в цьому випадку різко зростає витрата термопарного дроту. Отримані при безконтактному вимірюванні температури пірометром дані доцільно періодично контролювати термопарою.

На кінетичні характеристики процесів великий вплив надають потоки в рідких і газоподібних фазах. Для перемішування розплавів застосовують різного виду мішалки або барботируют ванну нейтральним газом. Інтенсивність перемішування характеризується частотою обертання мішалки або витратою газу, що продувається. Слід зазначити, що ці показники не дуже схожі. Якщо потрібно виключити перемішування, то процес проводять в капілярах — тонких трубках з великим відношенням довжини до діаметра.

Лабораторний експеримент рекомендується здійснювати в такій послідовності:

1. Визначить конкретну задачу дослідження, уточнити, які параметри і з якою точністю слід контролювати.
2. Вибрати або розробити методику експерименту.
3. Створити лабораторну установку.
4. На установці відпрацювати методику дослідження, визначити її

погрішність, при необхідності допрацювати установку.

5. Спланувати експеримент.

6. Виконати експеримент. Рекомендується неодноразово продублювати кожний досвід, але не виконувати всі дублі один за іншим, щоб не збільшувати вірогідність помилки. Необхідно вести робочий журнал, куди слід записувати всі спостереження в ході досвіду, навіть ті, які на перший погляд не мають до нього прямого відношення.

7. Спочатку обробити експериментальні дані, скласти таблиці, графіки, на цій основі уточнити план дослідів, визначити необхідні контрольні досліді і параметри, при яких вони проводяться.

Надалі результати експерименту піддають математичній обробці, висувають і перевіряють робочу гіпотезу.

5. ОСНОВНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ФИЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИН

На хід металургійних процесів великий вплив надають фізико-хімічні властивості матеріалів: густина, в'язкість, поверхневий натяг, коефіцієнти активності, молекулярної дифузії і т.д., що залежні, у свою чергу, від хімічного складу розплавів, розчинів і речовин. Ці властивості вивчають в лабораторних умовах з використанням ряду загальноприйнятих методів прямих і непрямих вимірювань, а також відомих ефектів, пов'язаних з визначуваними властивостями.

Густину розплавів знаходять, зокрема, по їх об'єму при відомій масі (метод дилатометра), по масі, що займає встановлений об'єм (метод пікнометра), або зважуванням поплавця відомого об'єму і маси після занурення в досліджуваний розплав (метод гідростатичного зважування). Найточнішим є метод проникаючого випромінювання, заснований на ослабленні пучка гамма-променів при проходженні через шар речовини. Інтенсивність потоку випромінювання експоненціально знижується залежно від складу, густини речовини і товщини поглинаючого шару. Цей безконтактний метод дозволяє працювати з агресивними речовинами і розплавами. В'язкість (внутрішнє тертя) – властивість текучих тіл (рідин і газів) чинити опір переміщенню однієї частини щодо іншої. Вона сильно впливає на механічний рух, тепло- і масоперенос в рідині. Відомі відносно прості методи визначення в'язкості: метод падаючої кульки, заснований на законі Стокса; метод капілярного закінчення, при якому вимірюють об'єм

рідини, що перетікає по тонкій трубці (капіляру), що сполучає дві судини. Їх загальний недолік – велика погрішність, зв'язана, зокрема, з трудністю спостереження і впливом поверхневого натягнення рідини. Більш точні ротаційний і вібраційний методи, засновані на опорі в'язкої рідини руху в ній тіла. При їх використуванні потрібне високочутливе лабораторне устаткування, а обробка результатів вимірювання супроводиться досить складними обчисленнями.

Поверхнєве натягнення розплаву грає певну роль при диспергування, утворенні нових фаз, розчиненні твердих тіл в рідинах. Для знаходження поверхневого натягнення використовують явище змочування (методи капілярного підйому, лежачої краплі, максимального тиску в пухирці), а також прямі вимірювання сил поверхневого натягнення (методи відриву кільця або пластини, краплі, що висить). Методи лежачої краплі і максимального тиску в пухирці придатні і для визначення густини розплаву.

Схема установки для вимірювання поверхневого натягнення методом максимального тиску в пухирці показана на рис.5.1. Манометром заміряють тиск в капілярі, необхідне для видавлювання пухирця газу в розплав. Після цього, виходячи з балансу сил, розраховують поверхнєве натягнення сталі:

$$\sigma = \frac{r_k \cdot g}{2} \cdot (H \cdot \rho_m - h \cdot \rho_{ж}),$$

де r_k — радіус капіляра; g — прискорення вільного падіння; H — свідчення манометра і глибина занурення капіляра в розплав; ρ_m , $\rho_{ж}$ — відповідно густина рідини в манометрі і густина розплаву.

Питому теплоємність, теплоту розчинення, тепловий ефект хімічних реакцій і інших процесів, як і інші теплові властивості речовин, визначають калориметричними методами. Існують різні методики вимірювання і типи калориметрів. Прилад має калориметричну судину з термометрами, наповнений калориметричною рідиною, яка поглинає що виділяється в ході досвіду тепло. Калориметрична судина поміщається в кублі, воно встановлено в оболонці, заповненою водою (рис.5.2). Оболонка калориметра може бути ізотермічною або адіабатичною. В ізотермічній оболонці температура води в ходу всього досвіду постійна, в адіабатичній вона весь час рівна температурі калориметричної судини. Для високотемпературних вимірювань застосовують масивні калориметри, у яких калориметрична судина з рідиною замінена масивним металевим блоком.

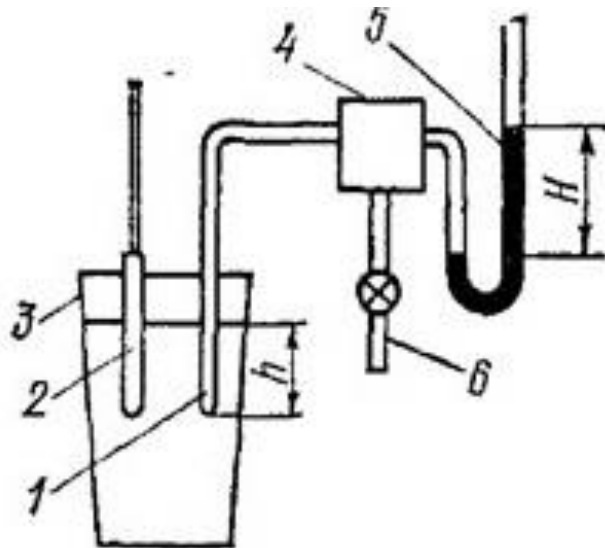


Рисунок 5.1 – Схема установки для визначення поверхневого натягу по максимальному тиску газу в пухирцю:

*1 — капіляр; 2 — термопара; 3 — тигель з розплавом;
4 — ємність з газом; 5 — манометр; 6 — підвод газу*

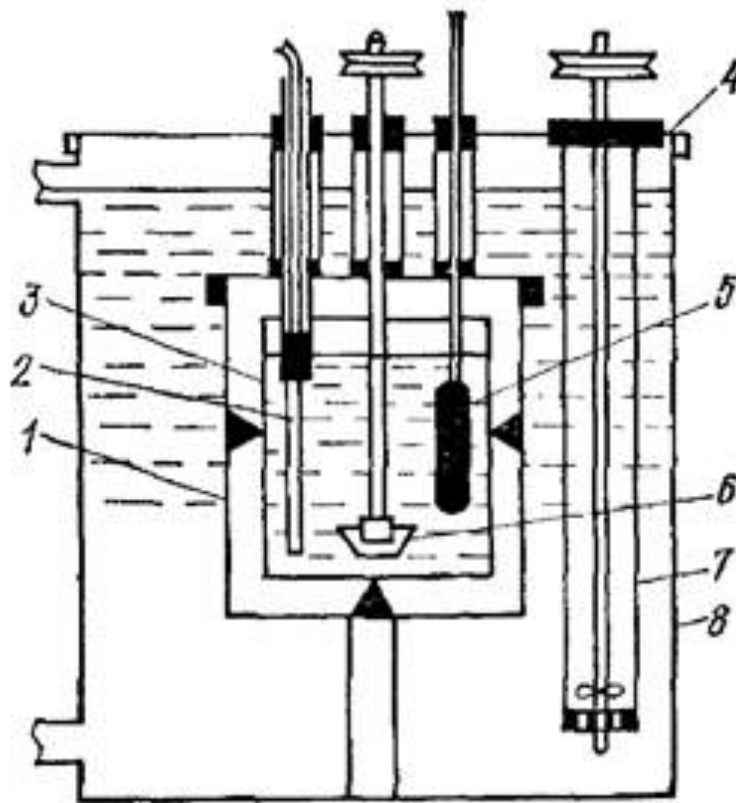


Рисунок 5.2 – Схема рідинного калориметра:

*1 — калориметрична судина; 2 — термометр; 3 — кубло калориметричної судини; 4 — кришка; 5 — нагрівач;
6, 7 — мішалки; 8 — оболонка*

Активність речовин в розплавах може бути встановлений розрахунковими і експериментальними методами. Якщо розчинений в металі компонент утворює газоподібний оксид, то застосовується метод, заснований на рівновазі розчину з газовою фазою відомого складу. Так, для визначення активності вуглецю, кисню і сірки можна використовувати відповідно суміші CO — CO₂ або CH₄ — H₂; CO — CO₂ або H₂ — H₂O і H₂O — H₂. Після витримки розплаву у контакті з газом, відбору і аналізу проб розраховують константу рівноваги реакції. Наприклад, для реакції

$$[C] + \{CO_2\} = 2\{CO\}$$

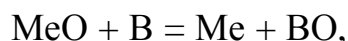
$$K = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2} \cdot a_C},$$

звідки знаходять активність вуглецю в розплаві a_C , а потім — коефіцієнт активності. Цей метод має ряд недоліків, пов'язаних з трудністю тривалої підтримки заданого складу газової фази в печі, явищем термодифузії в газах і ін.

Активність елемента в розплаві можна обчислити по тиску насиченої пари даного елемента над розплавом. На цьому принципі засновані методи Лангмюра і Кнудсена. В першому випадку визначають тиск насиченої пари по швидкості випаровування або сублимації у вакуумі з відкритою поверхнею, в другому виміряють швидкість закінчення пари у вакуумі через отвір, що калібрується. Тиск пари розраховують по зміні маси речовини в результаті випаровування за час досвіду, а потім за законом Рауля або Генрі встановлюють активність компоненту в розчині. Активність компоненту можна визначити і по його розчинності в розплаві (тільки для насичених розчинів) або по розподілу в двох фазах, що не змішуються, якщо відома активність в одній з них (наприклад, по розподілу кисню між залізом і чистим залізистим шлаком).

6. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДНОВНИХ ПРОЦЕСІВ

Відновний процес є однією із сторін єдності двох протилежних процесів: відновлення і окислення



де B — відновлювач металу Me з його оксиду MeO.

Очевидно, що метал Me відновлюється з оксиду Me, тоді, як реагент B випробовує протилежне перетворення — окислення в оксид BO. Тому для

здійснення процесів відновлення металів з оксидів необхідно мати реагенти (відновники), що володіють більш високою спорідненістю до кисню, ніж відновлюваний метал.

Найпоширенішими відновниками в чорній металургії є монооксид вуглецю CO , водень H_2 і вуглець C . В лабораторних дослідженнях ці відновники частіше за все застосовуються в чистому вигляді. У виробничих умовах, особливо в доменному процесі, вони, як правило, розбавлені азотом N_2 і продуктами реакцій відновлення — діоксидом вуглецю CO_2 і парами води H_2O .

Відновлення в лабораторних умовах частіше за все проводять з метою визначення показника відновленої залізорудної сировини. Під відновленою прийнято розуміти здатність залізорудної сировини віддавати відновнику кисень, пов'язаний із залізом.

Основним критерієм для кількісної оцінки відновленої прийнятий показник, званий ступенем відновлення, який виражається у відсотках, а визначається як відношення кількості кисню, що відняв від оксидів металу (заліза), до всієї кількості кисню, пов'язаного з металом (залізом), в масі проби, що піддається випробуванню.

Ступінь відновлення, що досягається, залежить від багатьох чинників, у тому числі від таких, як час, температура, вид відновника, швидкість його подачі в реакційну зону, швидкість відведення продуктів реакції, розмір шматків випробовуваної проби, зміст заліза, характер порожньої породи і ін. Тому, якщо необхідно порівняти відновлену двох або декількох матеріалів, в кожному досвіді слід дотримувати однакові умови.

Найпростіші методи визначення відновленої залізорудної сировини в лабораторних дослідженнях базуються на реєстрації втрати маси навішування в часі. Для цієї мети створюються лабораторні установки з печами для нагріву проб до температури відновлення і аналітичними терезами (або замінюючими їх автоматичними датчиками). Показник ступеня відновлення визначають на стандартній установці, схема якої показана на рис. 6.1. В установку входять: терези 6 (замість терезів може бути використаний датчик з автоматичним записом втрати маси проби по ходу відновлення), потенціометри 5 для реєстрації температури, термопари 4; реакційна трубка 3 з жароміцної сталі або кварцу з внутрішнім діаметром 60 мм; електрична піч опору 2, здатна забезпечити нагрівуючи

???????? установка!!!!

7. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОКИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

Окислювальні процеси вивчаються головним чином з метою оптимізації технології окислювального рафінування при виробництві сталі. Основні напрями лабораторних досліджень – термодинаміка окислювально-відновних реакцій, механізм і кінетика окислювальних процесів. Звичайно вивчають взаємодію металу з окислювальними шлаковою і газовою фазами. Істотну роль в окислювальному рафінуванні грають процеси взаємодії шлаку з металом і футеровкою, утворення окислювального шлаку, його фізико-хімічні властивості.

Взаємодію металу з шлаком вивчають в тиглях. На поверхню рідкого металу необхідного складу поміщають навішування або таблетку шлаку. На основі результатів контролю температури, складу фаз, часу реакції вивчають вплив перемішування розплаву, визначають швидкість взаємодії. За даними досвіду розраховують рівноважний зміст домішок, відхилення від рівноваги, енергію активації процесу, а по значенню останній — лімітуюча ланка. Знаючи лімітуючу ланку, можна виробити конкретні рекомендації по вдосконаленню технології виробничого процесу, які перевіряють шляхом промислового експерименту.

В загальному вигляді взаємодія газу з металевим розплавом включає такі етапи: упровадження газу в рідину з утворенням в ній газової порожнини; захоплення газовим струменем окремих об'ємів металу і їх дроблення на дрібні краплі; реакцію крапель з окислювальним газом струменя, що супроводиться утворенням оксидів заліза; упровадження окислених крапель у ванну і взаємодію оксидів заліза з домішками розплаву; евакуацію газових об'ємів з рідини. Таким чином, на процеси окислення при продуванні киснем основний вплив надають краплі металу, залучені в струмінь.

Вивчення фізико-хімічних процесів в краплях металу дозволяє уточнити модель процесів продування. Такі дослідження проводяться методами плавки в зваженому стані, розпиленість металу окислювальним газом на установках струменевого рафінування, трекових установках і ін. В цих дослідах вивчають хімічну взаємодію металу з тим, що рухається щодо нього окислювальним газом' насичення крапель киснем, кінетику окислення домішок, хімічний «вибух» крапель, як результат окислення вуглецю і виділення Z . Іноді на закінчення досвіду з розпиленістю металу або плавленням його в зваженому стані краплі загартовують у воді, що дозволяє фіксувати стан реагуючих фаз (металу і шлаку) в певний момент часу. Загартовані краплі розсіюють по

фракціях, визначають склад і кількість оксидної фази, вивчають їх структуру на рентгенівських мікроаналізаторах. Отримані результати дозволяють встановити швидкості процесів, їх залежність від розмірів крапель, швидкостей газових потоків і інших чинників.

Останнім часом перед дослідниками ставиться задача визначити співвідношення між прямою і двохстадійною схемами окислення домішок, послідовність їх окислення, місце переважного протікання окислювальних процесів і їх істинний порядок, лімітуюча ланка і його зміни залежно від умов окислення, швидкість окислювальних процесів, зокрема в режимі «тотального горіння».

Дослідження термодинаміки окислювальних процесів проводять, щоб визначити константи рівноваги реакцій і активності компонентів металургійних розплавів. При цьому використовують розглянуті раніше методи.

Термодинаміка окислювальних процесів розроблена достатньо детально, питання ж кінетики вивчені набагато слабше. При дослідженні механізму і кінетики окислювальних процесів часто вдаються до фізичного моделювання, причому велику увагу надають механізму взаємодії газового струменя з рідкою ванною. Його досліджують на холодних і гарячих моделях. В першому випадку метал імітують водою, різними водними розчинами, ртуттю, через які продувають стисле повітря, кисень, перегріту водяну пару і інші гази. Холодне моделювання допомагає вирішувати як теоретичні, так і прикладні задачі. До перших відносяться вивчення гідродинамічних характеристик ванни в ході продування; ежекції рідини струменем газу; дроблення рідини в струмені і ін. Практичне значення мають відробіток конструкцій дугтових пристроїв і окремих сопел; уточнення залежності розмірів глибини і діаметра зони взаємодії від параметрів продування (розташування фурми над ванною, тиску і витрати дугтя). Ці результати використовуються при проектуванні агрегатів і фурм.

Проте при холодному моделюванні не цілком враховуються фізико-хімічні процеси, супроводжуючі взаємодію окислювального газу з металом. Цього недоліку позбавлено гаряче моделювання, виконуване на розплавленому металі. В той же час гаряче моделювання відрізняється складністю роботи з високотемпературним розплавом і несприятливими умовами для спостереження і контролю за процесом. Щоб можна було спостерігати і фіксувати поведінку реакційної зони за допомогою фото- і кінозйомки

В.І.Баптизмаський і В.Б.Охотський із співробітниками запропонували

використовувати для продування тигель, одна із стінок - якого виконана з кварцового скла (фурма розташовується біля цієї стінки). Така методика в даний час широко поширена; з її допомогою були уточнені параметри реакційної зони і механізм взаємодії кисню з металом. У формуванні основного окислювального шлаку в сталеплавильних процесах головну роль грає розчинення вапна. Дослідження закономірностей розчинення вапна в шлаку звичайно зводяться до вивчення впливу складу шлаку, його перегріву, в'язкості, якості вапна і умов перемішування шлакового розплаву. Рідкий шлак для дослідів одержують в індукційній печі шляхом розплавлення на поверхні металеві ванни або в печі опору, де створюють нейтральну або окислювальну атмосферу. Зразки вапна виготовляють пресуванням у вигляді таблеток або вирізують з цілого шматка. Потім їх поміщають в рідкий шлак відомого складу і витримують певний час. Швидкість розчинення зразків знаходять по втраті маси або за часом повного розчинення. Вплив перемішування в шлаку вивчають, обертаючи зразки з певною швидкістю, барботируя ' розплав або застосовуючи мішалки. Механізм процесу встановлюють за даними петрографічного дослідження зразків після витримки в, шлаку. Аналогічним методом вивчають розчинення вогнетривів в шлаку, вуглецевих матеріалів в металі і т.д.

8. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

Теплообмінні процеси в лабораторних умовах досліджують двома основними методами: прямими вимірами і із застосуванням установок, заснованих на електро-гідротеплової аналогії. Першим методом досліджують теплообмін -у відносно невеликих об'ємах речовин. Другий метод використовується стосовно складних натурних процесів, коли безпосередньо визначити теплові параметри (температура, теплові потоки) складно.

Найбільший інтерес представляють нестационарні теплові процеси, що характеризуються зміною температурних полів в часі: нагрівачи і охолодження футеровки різних печей і агрегатів, прогрів шихти, нагрівачи виливниць і охолодження злитків. Основний прийом їх дослідження полягає у вимірюванні температури на різних ділянках об'єкту. Отримані результати піддаються математичній обробці. Як датчики частіше за все використовуються термопари. При вимірюваннях температури футеровки спосіб установки термопар визначається їх розташуванням, конструкцією і матеріалом футеровки. В печах і агрегатах з набивної футеровкою термопари

зкладають при набиванні. У випадку цегляної футеровки ця задача полегшується тим, що термопари укладають в пази, виконані в одному або декількох цеглин. Для зменшення погрішностей термопари слід встановлювати так, щоб ділянки електродів на 20—50 мм від гарячого спаю розташовувалися в полі приблизно однакових температур (рис.8.1, а).

При вимірюванні температури рідких середовищ електроди термопар пропускають через футеровку, а спай захищають вогнетривким чохлам.

Для виміру температур в суцільному металі (стінка виливниці, фурми) зручніше наперед змонтувати блок термопар в стрижні з такого ж металу, а потім вставити його в отвір, висвердлений в необхідному місці. Необхідно забезпечити надійну електроізоляцію електродів термопари від металу; стрижень повинен входити в отвір з мінімальним зазором, який при необхідності закарбовують або заварюють (рис.8.1, б).

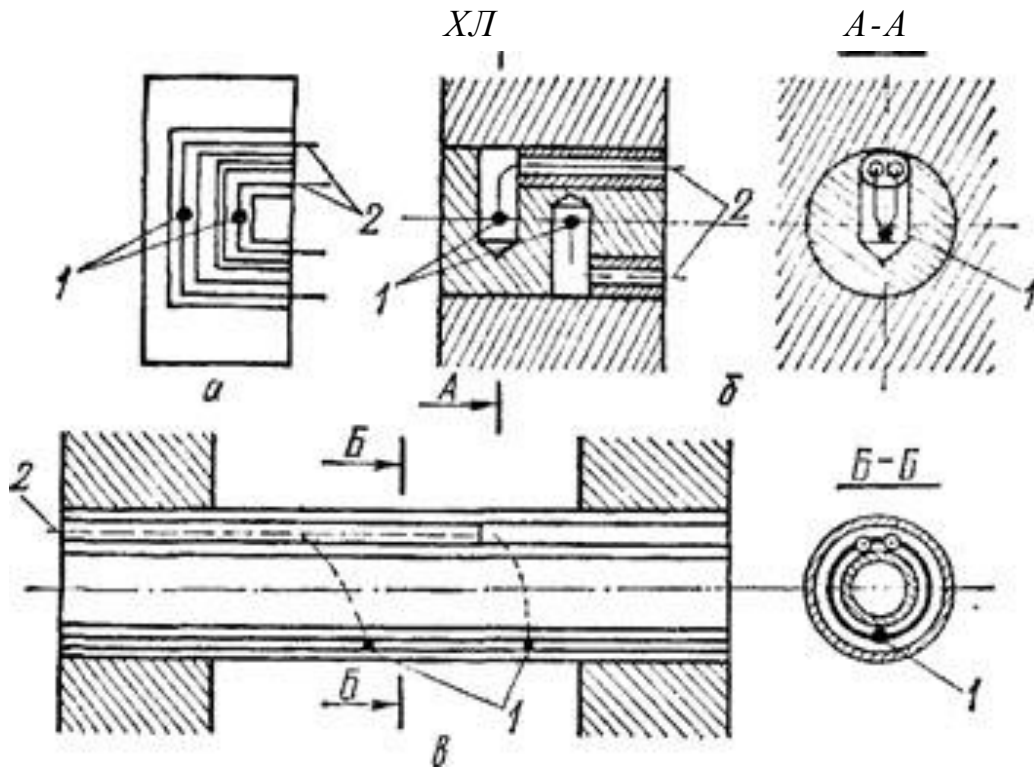


Рисунок 8.1 – Конструкції блоків термопар для заміру температур в різноманітних середовищах:

а) – у футерівці; б) – у стіні виливниці; в) – у металі, що кристалізується;
1 – спай термопар; 2 – виводи електродів термопар

При вимірюваннях температури твердої сипкої шихти (агломерація, відновні процеси), металеві шихти, розплавленого металу, твердого злитка термопари встановлюють в захисних чохлах. Матеріал чохла (фарфор, кварц, алунд, спеціальна кераміка) вибирають з урахуванням температур і

агресивності середовища, що заміряються. Для вимірювання в декількох крапках на одній прямій термопари доцільно поміщати між концентричними трубками з вогнетривких матеріалів, виконуючими роль захисних чохлаів (рис.8.1, с). Температуру відкритої поверхні шлакових або металевих розплавів виміряють оптичним пірометром відповідного типу.

8.1. Методи експериментального дослідження полів температури

Вимірювання полів температури проводиться в основному рухомими зондами, на кінці яких розташовуються датчики температури: термоелектричні перетворювачі, термоперетворювачі. Чутливий елемент датчика (спай термоелектричного перетворювача, нитка або плівка термоперетворювача опору) знаходиться у контакті з досліджуваною рідиною. Конструкції типових датчиків температури показані на рис.8.2.

Зонди вводяться в потік або через стінку робочої камери, в якій розташовано об'єктне тіло, або через стінку труби або її вихідний торець (рис.8.3).

Місце введення герметизують ущільненнями сальникового типу або за допомогою сільфонов. Переміщення зонда і визначення положення в потоці його чутливого елемента здійснюються за допомогою координатного пристрою, забезпеченого мікрометричним гвинтом або стандартними механічними індикаторами.

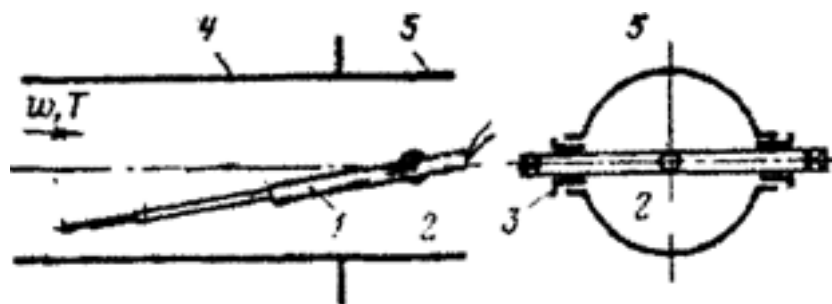


Рисунок 8.2 – Рухомий зонд для вимірювання поля температури або швидкості:

1 — тіло ЮИД4; 2 – повороний вал; 3 - система ущільнення; 4 — труба. 5 - ішиера юяда

8.2. Вимірювання температури твердих тіл

Найбільш поширені вимірювання за допомогою термоелектричних перетворювачів як унаслідок зручності їх монтажу, так і через можливість вимірювання розподілу температури по поверхні тіла і усередині нього. Термопреобразователі опори в звичайних температурних областях застосову-

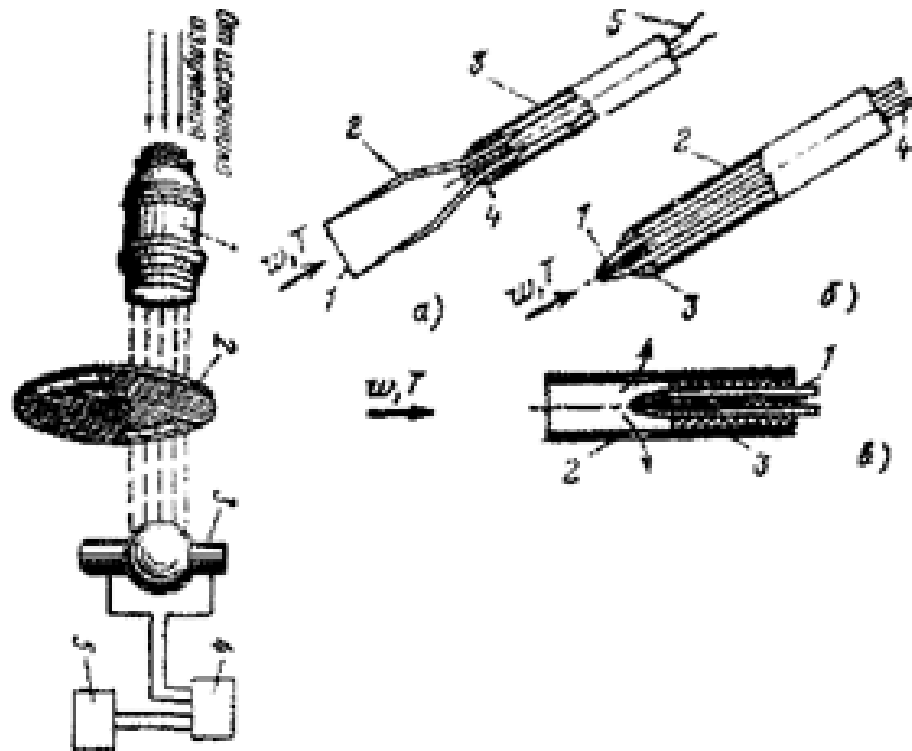


Рисунок 8.3 – Принципіальна схема вимірювання температури кольоровим пирометром (а) та термопар (б).

ють для вимірювання середньої температури тіла або його поверхні. В тілах без внутрішніх джерел теплоти спаї термоелектричних термоперетворювачів і їх дроту розміщують в пазах або свердленнях. Спаї термоперетворювачів приварюють, припаюють або закарбовують, а пази заповнюють матеріалом з теплопровідністю, близькою до теплопровідності тіла (рис.8.4). При вимірюванні температури трубок або стрічок, що обігріваються що пропускається через них електричним струмом (тобто тіл з внутрішніми джерелами теплоти), спосіб кріплення спаїв термоелектричних перетворювачів розрізнений при змінному і постійному струмі. У разі обігріву змінним струмом спай термоперетворювачі може знаходитися в електричному контакті з тілом.

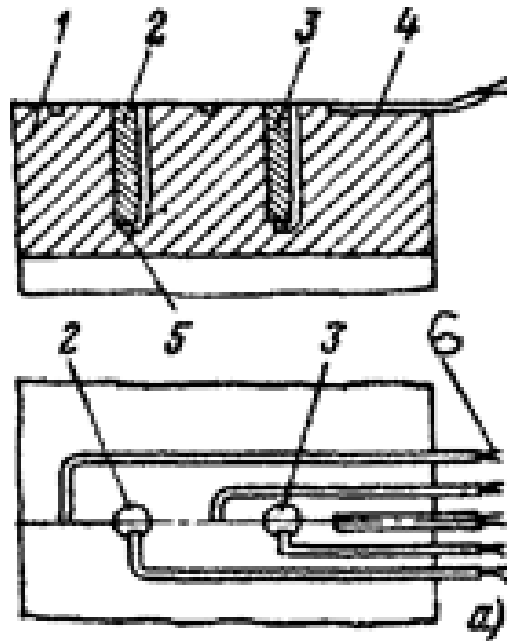


Рисунок 8.4 – Способи заделки термоелектричних перетворювачів для вимірювання температури у твердому тілі:

1 — труба; 2 - пробки; 3 - канавки; 4 – капіляри; 5 – спаї; 6 – провoda термопар

9. ТИСК

Молекули всякого паро- або газоподібного робочого тіла, що знаходиться в судині (паровий казан, циліндр компресора або насоса, сопло турбіни і т.д.), постійно рухаючись, ударяються об його стінки. Сукупність таких ударів сприймається стінками судини як деякі безперервно діюче на них зусилля. Величину цього середнього результуючого зусилля, що доводиться на одиницю поверхні судини і діючого по нормалі до неї, називають тиском газу. Розрізняють тиск абсолютний і надмірне.

Абсолютний тиск - цей дійсний тиск робочого тіла усередині судини.

Надмірне — різниця між абсолютним тиском в судині і тиском навколишнього середовища.

Прилад, що служить для вимірювання цієї різниці тиску, називається манометром, а надмірний тиск - відповідно манометровим. Таким чином, коли тиск в судині перевищує тиск оточуючої серед

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{ман}} + P_{\text{бар}} \quad (5)$$

або

$$P_{\text{ман}} = P_{\text{абс}} - P_{\text{бар}} \quad (6)$$

де $P_{\text{абс}}$ - абсолютний тиск в судині; $P_{\text{ман}}$ — манометровий тиск; $P_{\text{бар}}$ - тиск навколишнього середовища (барометричне або атмосферне).

Якщо абсолютний тиск менше тиску навколишнього середовища, то

різницю між ними називають розрідженням або вакуумом. Для вимірювання його служить вакуумметр, що показує різницю тиску навколишнього середовища і абсолютного тиску (розрідження) газу в судині. В цьому випадку

$$P_{абс} = P_{бар} - P_{вак} \quad (7)$$

або

$$P_{вак} = P_{бар} - P_{абс} \quad (8)$$

де $P_{вак}$ – розрідження (вакуум).

Співвідношення між барометричним (атмосферним), манометровим (надмірним.) тиском і вакуумом показано на рис.9.1.

В Міжнародній системі одиниць (СІ) тиск вимірюють в паскалях (Па). **Паскаль** - цей тиск, що викликається силою 1 Н на 1 м² площі і діючої по нормалі до неї. Приведемо деякі співвідношення між одиницями тиску, необхідні при рішенні термодинамічних задач:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Па} &= 1 \text{ Н/м}^2 = 0,1 \text{ кг/м}^2; \\ 1 \text{ кг/м}^2 &= 9,8 \text{ Н/м}^2 = 10 \text{ Па} \\ 1 \text{ КПа} &= 10^3 \text{ Па}; \\ 1 \text{ МПа} &= 10^6 \text{ Па}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ ат.техн.} &= 1 \text{ кг/см}^2 = 10000 \text{ кг/м}^2 = 100000 \text{ Па}; \\ 1 \text{ ат.техн.} &= 0,1 \text{ МПа} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ мм рт.ст.} &= 13,6 \text{ мм вод.ст.} \\ 1 \text{ ат.техн.} &= 735 \text{ мм рт.ст.} = 13,6 \cdot 10000 \text{ мм вод.ст.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ кг/м}^3 &= 1 \text{ мм вод.ст.}; \\ 1 \text{ Па} &= 0,1 \text{ мм вод.ст.} \\ 1 \text{ ат.физич.} &= 760 \text{ мм рт.ст.} = 13,6 \cdot 10,332 \text{ мм вод.ст.} \\ 1 \text{ ат. физич.} &= 1,033 \text{ ат.техн.} \end{aligned}$$

$$1 \text{ мм рт.ст.} = 13,6 \text{ мм вод.ст.} = 13,6 \text{ кг/м}^2 \cdot 9,8 \text{ Н/м}^2 = 133,3 \text{ Н/м}^2$$

$$1 \text{ ат.физич.} = 760 \text{ мм рт.ст.} \cdot 133,3 \text{ Н/м}^2 = 101325 \text{ Н/м}^2.$$

Необхідно мати на увазі, що при визначенні тиску приладами, в яких як вимірник використовується висота стовпа ртуті, на свідчення приладу впливає не тільки тиск середовища, але і температура ртуті, що вимірюється, оскільки із зміною останній міняється густина ртуті, а отже, і висота її стовпа. При температурі вище 0 °С свідчення приладу дають великі значення і, навпаки, при негативних температурах висота стовпа менше. Тому необхідно приводити висоту ртутного стовпа до 0 °С введенням поправки на температуру ртуті в приладі.

Абсолютний тиск

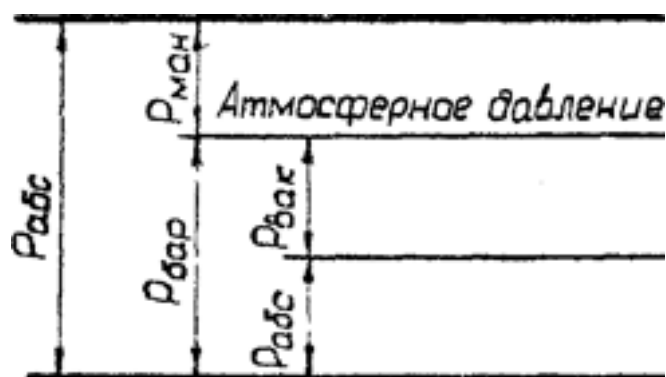


Рисунок 9.1 - Відношення між абсолютним, атмосферним та надлишковим тиском

Приведення свідчень ртутного барометра до 0°C здійснюється по формулі [6].

9.1. Вимірювання тиску

За принципом дії розрізняють рідинні і пружинні прилади для вимірювання тиску і розрідження. В рідинних приладах сила тиску, що вимірюється, врівноважується вагою стовпа рідини, в пружинних — напругою пружних елементів (мембран, сільфонов, трубчастих пружин). Якнайменшою погрішністю володіють рідинні прилади, а серед механічних — компенсаційні прилади.

9.2. Рідинні прилади тиску

Рідинні прилади мають невелику погрішність, тому їх часто використовують як контрольні або зразкові прилади. Як врівноважуюча рідина звичайно застосовують спирт, трансформаторне масло, воду і, рідше, ртуть.

Максимальні межі вимірювання рідинних приладів визначаються густиною врівноважуючої рідини ρ і граничною висотою стовпчика рідини $P_{\text{макс}}$ при якій ще не спостерігається витіснення рідини з приладу:

$$P_{\text{макс}} = c^{\wedge}_{\text{макс}}$$

Рідинні скляні манометри. До них відносяться двотрубні (U-образные) і однострубні (чашкові). Ці прилади служать для визначення надмірного тиску, що не перевищує 0,2 МПа (2 кгс/см²).

Найбільш широко поширений двотрубний манометр (рис.9.2, а), що складається з скляних вимірювальних, сполучених внизу між собою трубок 7 і

2. Між трубками поміщена двостороння шкала (на малюнку не показана).

Прилад заповнюється робочою рідиною до нульової відмітки в середині шкали. Трубка 1 (плюсова +) з'єднується з вимірюється середовищем, що знаходиться під абсолютним тиском (під великим тиском P_1 , а трубка 2 (мінусова -) - з атмосферою (з меншим тиском P_2).

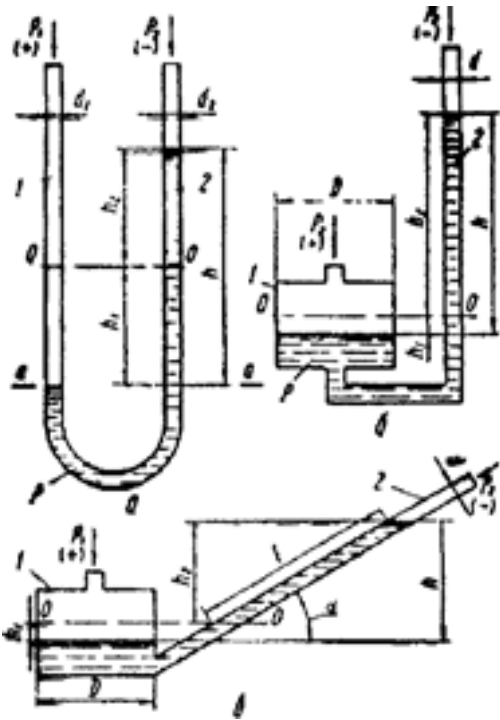


Рисунок 9.2: Рідинні стеклянні манометри:

a — U-образний; *б* — чашечний з вертикальною трубкою; *в* — чашечний з наклонною трубкою.

Таким чином, надмірний тиск $P_{и}$ визначається висотою стовпа і густиною рідини і не залежить від площі поперечного перетину вимірювальних трубок.

При вимірюванні тиску двотрубним манометром представляє незручність необхідність відліку рівнів рідини одночасно в обох трубках. При значних пульсаціях тиску це утрудняє точний відлік свідчень.

Цього недоліку позбавлені однотрубні манометри (рис.9.2, б), які відрізняються від двотрубних тим, що замість плюсової трубки вони мають широку металеву або скляну судину (чашку). Судина 7 і трубка 2 заповнюються робочою рідиною до нульової відмітки шкали. Шкала

При включенні манометра в роботу різниця тиску $P_1 - P_2$, що вимірюється, зрівноважується висотою стовпа робочої рідини H , відлічуваної по шкалі приладу. Оскільки рівень рідини в трубці 1 знизиться, а в трубці 2 зросте, то загальна висота стовпа H буде рівна сумі відліків, вироблюваних по шкалі вище і нижче за нульову відмітку:

$$H = P_1 - P_2$$

Якщо робочою рідиною служить вода або спирт, то відлік свідчень ведуть по нижній межі її меніска, якщо ртуть, — по верхній. У момент рівноваги для перетину $a - a$ можна записати

$$P_{и} = \rho gh = P_1 - P_2$$

розташовується уздовж трубки 2.

При вимірюванні тиску чашковим манометром відлік свідчень проводять тільки по відхиленню рідини в трубці 2 (по висоті стовпа h_2). Загальна висота стовпа рідини, що врівноважує тиск, що вимірюється

$$h = h_2(1 + d_2/D_2) \quad (9.1)$$

З рівняння (9.1) виходить, що загальна висота стовпа рідини h більше зміряної по шкалі на величину $h_2 d_2/D_2$. Звичайно $d_2/D_2 < 1/400$, тобто h_2 або остаточно

$$P_{\text{и}} = \rho g h_2$$

Для точних вимірювань невеликого тиску газоподібних середовищ застосовується однотрубний манометр з похилою вимірювальною трубкою — мікроманометр (мал. 9.2, в). Він має широку металеву або скляну судину 1 і сполучену з ним одним кінцем скляну вимірювальну трубку 2, уздовж якої розміщена шкала. Трубка розташована під кутом α до горизонту. Межі вимірювання мікроманометрів до 2500 Па (250 кгс/м^2). Основна погрішність вимірювання не більше 1,5%.

В мікроманометрах діаметр судини вибирається досить великим, тому при вимірюваннях нехтують пониженням рівня рідини в ньому. У зв'язку з цим що вимірюється мікроманометром тиск $P_{\text{и}} = \rho g h$

Відлік свідчень ведуть не по величині h , а по переміщенню рідини в трубці 2, тобто по величині L . Оскільки

$$h = L \sin \alpha, \text{ то } P_{\text{и}} = \rho g L \sin \alpha$$

Оскільки L завжди більше h то точність відліку величини L завжди вище за точність відліку h .

Загальними недоліками рідинних манометрів є: велике запізнювання; можливі викиди; витоки рідини малі межі вимірювання.

Пружинні манометри не мають цих недоліків і володіють наступними перевагами: простота пристрою; більша межа вимірювань; можливість застосування дистанційної передачі о і автоматичного запису свідчень. Проте при вимірюванні малого тиску погрішність пружинних приладів більше, рідинних.

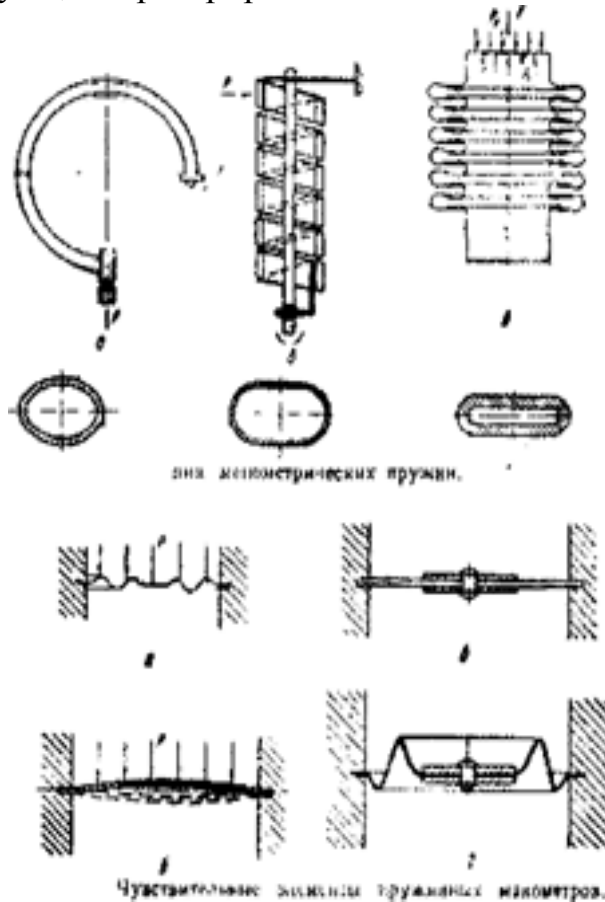
Дія пружинних манометрів заснована на вимірюванні величини деформації, різних пружних елементів, викликаній зміною тиску. Деформація пружного елемента перетворюється передавальним механізмом в кутове або лінійне переміщення покажчика по шкалі приладу.

По типу вживаних пружин манометри діляться на трубчасті та мембранні.

В цілому пружинні манометри підрозділяються на прилади:
 з одновитковою трубчастою пружиною (рис. 9.2, а)
 з багатовитковою (геликоїдальною) трубчастою пружиною (мал. 9.2 б);
 з гармониковою мембраною (сільфоном, мал. 9.2, б);
 з гофрованою (мал. 9.3 а) або плоскою (рис 9.3,б) металевою мембраною;
 з плоскою (мал. 9.3, в) або гофрованою (мал. 9.3, г) млявою мембраною.

При деформації пружна манометрова пружина створює протидіючу силу. Часто на додаток до манометрової пружини (до мембрани або сільфону) для розвантаження її додає гвинтова пружина на яку покладається основна роль по створенню протидіючої сили.

Мляві мембрани завжди комплектуються додатковою пружиною. Металеві манометрові пружини виготовляється з фосфорної олов'янистої або берилієвої бронзи марок Бр. Б2-Бр. Б2,5, або з неіржавіючої сталі Н36ХТЮ, мляві мембрани - з гуми, шкіри прорезиненої тканини і т.п.



Мал. 9.3 Типи мембран манометрів

9.3. Зондові методи вимірювання полів тиску в потоках рідини і газу

Для вимірювання полів *статичного* тиску використовують подовжньо обтічні трубки, клини або шайби з відборами тиску (отворами) на бічній поверхні, паралельній лініям струму набігаючого потоку. В потоках з однорідним полем тиску відбори виконують в стінках труб або робочих камер. Вісь відбору тиску повинна бути перпендикулярний їх поверхні. Радіуси отворів повинні бути не більше Од радіусів кривизни поверхні тіла в даній крапці щоб уникнути утворення вторинних течій в області приймального отвору, але не менше 0,2 мм

Мінімальні розміри обмежені зростанням гідравлічного опору відборів, через які до вимірника тиску перетікає частина робочої рідини. Це обмеження особливо істотно при вимірюванні нестационарного тиску.

Повний тиск C_0 (тиск гальмування) вимірюється за допомогою пересувних зондів з приймальним отвором, встановленим назустріч потоку. Звичайно використовують подовжньо обтічні трубки круглого поперечного перетину або із сплюснутим кінцем. Для таких трубок допустимо відхилення осі від напрямку течії в межах $\pm 10^\circ$. Тиск не рівний в точності, що вимірюється, тиску в області розташування приймального отвору унаслідок гідродинамічних ефектів, що виникають при обтіканні трубки. Для круглої трубки в потоці нестискуваної рідини це відхилення можна оцінити по емпіричній формулі:

$$\frac{P_{\text{вим}} - P_0}{\frac{\rho w^2}{2}} = 1 + \frac{5,6}{Re}$$

де $Re = \frac{vdZv}{\nu}$ — число Рейнольдса, визначуване по швидкості набігаючого потоку m^2 і зовнішньому діаметру трубки ν ; ρ і ν — густина і кінематична в'язкість рідини (газу). Переміщення трубок повного тиску і визначення координат положення приймального отвору проводять за допомогою координатних пристроїв типу показаних на рис.9.5.

10. НАПІВПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Напівпромисловими або досвідчено-промисловими дослідженнями називаються такі, які проводяться на установках і агрегатах значних розмірів і продуктивності, що має всі основні елементи для здійснення промислової технології (сирі матеріали, готова продукція, контроль,

механізація, автоматизація і управління технологічним процесом, конструкції агрегату), а також на промислових агрегатах, спеціально виділених або побудованих для проведення досліджень або випуску продукції нових зразків.

Задачею напівпромислових досліджень є відробіток у великомасштабних умовах нових технологічних і конструктивних рішень перед їх широким промисловим упровадженням. Напівпромислові дослідження — це перехідна стадія від лабораторних розробок до упровадження нових технологій, конструкцій, виробів. Разом з технічними рішеннями на цій стадії вивчаються питання економіки процесу, організації праці, управління процесом, якості продукції. З технічних рішень на перший план висувуються такі, які пов'язані з тривалою безперервною роботою в умовах підприємства — надійність окремих вузлів агрегатів, стійкість їх частин, особливо футеровки, досконалість методів контролю і управління процесом, можливість зміни сортаменту продукції, що випускається, використання різних видів сировини, умови ремонту устаткування і ін. Витрати на напівпромислові дослідження значні, оскільки пов'язані з капітальними вкладеннями на будівництво крупних установок. Тому рішення про проведення таких досліджень приймаються тільки після глибоких теоретичних і лабораторних опрацювань за наявності техніко-економічного обґрунтування.

Однією з основних баз досвідчено-промислових досліджень в чорній металургії є НВО «Тулачермет». В ньому розроблялися багато нових технічних рішень в області металізації металургійної сировини, киснево-конвертерного процесу, безперервного розливання сталі, електросталеплавильного виробництва. Останніми роками тут відпрацьовується на конвертері 10-тонни технологія процесу з донним киснево-паливним дуттям, при підвищеній частці лому в шихті, створюються конструкція горизонтальних машин безперервного литва заготовок і технологія розливання на них, ведуться інші крупні дослідження.

Практично на кожному великому металургійному підприємстві працювали або є досвідчено-промислові установки. Так, на комбінаті «Запорозжсталь» експлуатувалася досвідчена шахтна піч по металізації окатишів, в мартенівському цеху був споруджений крупний сталеплавильний агрегат безперервної дії продуктивністю 30—40 т/ч, на комбінаті ім. Дзержинського проводилися дослідження на секторній моделі (у натуральну величину) сурми доменної печі, на споруджуваному в даний час Ново-Оскольському електрометалургійному комбінаті передбачається будівництво цеху досвідчених агрегатів і т.д.

На відміну від промислових на досвідчено-промислові агрегати

або зовсім не встановлюють план випуску готової продукції, або значно зменшують планові завдання, які складають з урахуванням експериментального характеру цих установок. Виконуваний на них об'єм роботи визначається програмою досліджень. Для здійснення останній виділяються матеріальні і трудові ресурси (сировина, змінне устаткування, штат обслуговуючого персоналу і ін.).

Особливістю досліджень в досвідчено-промислових умовах є те, що вони ведуться комплексно. Велику увагу надається контролю якості готової продукції, технологічного процесу, питанням економіки і організації праці. Результати напівпромислових досліджень відносно швидко упроваджуються у виробництво. Якщо досвідчено-промисловий агрегат був споруджений на заводі, то після виконання програми досліджень і освоєння агрегату для нього встановлюють планові завдання і перекладають на роботу в промисловому режимі.

11. ПРОМИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Значна частина досліджень металургійних процесів проводиться в промислових умовах – на агрегатах і установках, діючих в доменних, сталеплавильних і електросталеплавильних цехах, на аглофабриках. В ході цих досліджень відпрацьовують нові технологічні процеси і конструкції устаткування;

освоюють і упроваджують нові технологічні прийоми, системи контролю і засоби автоматизації існуючих процесів; удосконалюють технологічні процеси, методи їх контролю і управління, конструкції агрегатів і устаткування.

Найважливіша особливість промислових досліджень полягає в тому, що вони ведуться паралельно з виконанням на діючих агрегатах планових завдань по випуску продукції. Резерви виробничих потужностей, які дозволили б використовувати час і матеріальні засоби для проведення дослідницької роботи, в більшості випадків відсутні, у зв'язку з чим намічені заходи не повинні викликати простоїв, зниження продуктивності устаткування і погіршення якості продукції.

Другою особливістю є складність створення задовільної методики досліджень сучасних металургійних процесів в промислових умовах. Це, як указує В.І.Явойській, пов'язано з трудностю виявлення специфічної ролі

того або іншого чинника, що характеризує технологію, затушовуванням цієї ролі іншими, іноді ще важче що піддаються обліку чинниками.

Для промислових агрегатів і технологічних процесів кінцевий результат визначається дією безлічі взаємозв'язаних чинників. Дуже складно зафіксувати на постійному рівні все їх, крім того, який з'являється інтерес в даний момент. Це не означає, що неможливо проводити дослідження в умовах виробництва, але методи роботи дослідника і обробки даних в промислових і лабораторних умовах істотно різні. Останнє, зокрема, пояснюється тим, що вживані на виробництві засоби контролю менш точні, ніж що використовуються в лабораторному експерименті.

Тематика промислових досліджень визначається насущними вимогами виробництва і перспективами його розвитку. Частина досліджень націлена на поліпшення якості продукції на всіх стадіях технологічного циклу, наладка випуску нових матеріалів і виробів, збільшення продуктивності і підвищення інших техніко-економічних показників агрегатів.

Промислові дослідження проводяться на встановлених в металургійних цехах агрегатах (доменних і феросплавних печах, кисневих конвертерах, мартенівських, двохванних і електросталеплавильних печах) і розливному устаткуванні. Основний метод досліджень в промислових умовах — це проведення технологічних процесів в досвідчених режимах, розроблених на підставі літературних даних, теоретичного аналізу, лабораторних або досвідчено-промислових експериментів. Елементами досвідченої технології можуть бути нові теплові, температурні і дугтовий режими; види сировини, вогнетривів, палива, технологічних присадок; вдосконалені конструкції окремих вузлів агрегатів і ін. Для контролю за процесом використовуються в цеху контрольно-вимірювальні засоби, у ряді випадків — додатково встановлювані або переносні прилади. Необхідні аналізи виконують в заводських лабораторіях і частково — в лабораторіях дослідницьких інститутів. Спочатку проводять одиничні досліді на окремому агрегаті, в ході яких випробують різні зміни технологічних режимів. Кращі варіанти перевіряють в невеликих серіях дослідів, виконуваних на одному агрегаті протягом декількох діб, іноді — тижнів. Результати порівнюють з виробничими даними, отриманими на цьому ж агрегаті до і після дослідів. Таким чином можна виключити вплив ряду непіддатливих обліку чинників і оцінити достоїнства і недоліки того або іншого варіанту технології.

Якщо встановлені певні переваги досвідченої технології перед існуючою, то один з агрегатів цеху на деякий час перекладають на роботу за новою технологією. Надалі при отриманні позитивних результатів роблять доповнення або зміни до діючої технологічної інструкції і все устаткування

цеху перекладають на роботу за вдосконаленою технологією. Враховуючи, що при проведенні промислового експерименту зниження продуктивності устаткування і якості продукції неприпустимо, інформацію про хід і результати процесу одержують шляхом хронометражу, контролю показників за допомогою є в цеху приладів, відбору проб металу, шлаку і газу, вимірювань температури.

Хронометраж проводять з метою точного визначення тривалості технологічних операцій, зокрема таких, які не фіксуються в цеховій документації. Одночасно реєструють кількість і порядок введення різних матеріалів, результати візуальних спостережень за ходом процесу, свідчення контрольно-вимірювальних приладів, порядок відбору проб і дані їх аналізу, виміри температури і ін. Проби відбирають за прийнятій в цеху технологією, іноді з цією метою агрегати обладнають спеціальними пристосуваннями, що не порушують технологічний процес. Методи відбору проб і конструкції пробовідбірників дуже різноманітні і залежать від вирішуваних задач.

При розробці методики і організації досліджень в цехових умовах слід надати особливу увагу питанням техніки безпеки. Часто доводиться працювати з рідкими металом і шлаком, гарячими газами, токсичними середовищами, при високому тиску газів і рідин, в приміщеннях, обладнаних підйомно-транспортними машинами, тобто в умовах підвищеної небезпеки. Тому дослідницький персонал повинен бути знайомий з правилами техніки безпеки і забезпечений необхідним спецодягом.

Перед виконанням промислових досліджень відповідно до календарного плану НДР складають поточний план-графік, що узгоджується з планом роботи цеху. Після твердження, керівництвом цеху він стає офіційним документом, що дозволяє проведення дослідження.

12. В'ЯЗКІСТЬ ШЛАКІВ

Технолог повинен добре знати найважливіші фізичні властивості шлаків різного складу — їх в'язкість, тугоплавка, температури плавлення. Всі ці характеристики визначаються в лабораторних умовах по представницьких пробах натуральних шлаків, відібраних з робочого простору зондуванням або з жолоба при випуску, а при спеціальних дослідженнях — по пробах, приготованих з чистих хімічних реактивів.

Для вимірювання в'язкості використовують різного типу віскозіметри. Останнім часом частіше всього застосовують електровібраційні віскозіметри (рис.12.1). Електровібраційний вузол віскозіметра складається з постійного

магніта 8, катушки з обмоткою 7, в порожнину якій входить центральний виступ постійного магніта 8. За допомогою стійок 6 постійний магніт 8 через систему пружинного пристрою 9 зміцнюється на жорстких консолях станини 10. Знизу пружинної опори 9 укріплений магнітопровід 11, симетрична частина якого входить в спіраль катушки і утворює електромагніт 13. Донна частина катушки 7 зв'язана стрижнем з якорем вібратора 12, який, у свою чергу, сполучений стрижнем із затиском 14, несучим шпіндель 15, занурений в розплав шлаку, що знаходиться в тиглі 16. Для високотемпературного нагріву тигля і розплавлення шлаку служить пекти 17 (кріптолова, Таммана або високочастотна). Пекти харчується струмом через автотрансформатор 1. Усередині опори у дна тигля розташований спай термопари 18, підключеної до входу двохкоординатного потенціометра ПДС-021 4. З цим приладом сполучено через діод 5 обмотку катушки 7.

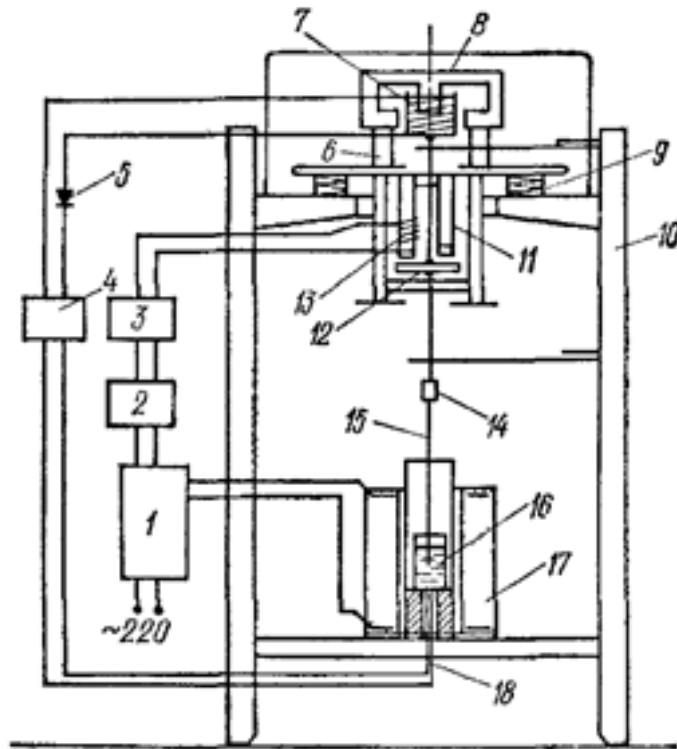


Рисунок 12.1 – Схема електровібраційного віскозіметра

В'язкість шлаку виміряють за допомогою описаного віскозіметра таким чином. Після розплавлення і перегріву (до 1600°C) задають постійну температуру розплаву і занурюють в шлак нижню частину шпінделя 15. Потім пропускають змінний струм через катушку електромагніту а 13. В магнітопроводі 11 створюється змінне магнітне поле, що викликає коливання якоря 12 і всієї пов'язаної з ним системи (у тому числі шпінделя) з частотою живлячого змінного струму. Робота віскозіметра стійка при максимальній амплітуді коливання стрижня з шпінделем. Необхідно також, щоб вся

система знаходилася в резонансі, встановлюваному за допомогою спеціального приладу — звукового генератора ГЗ-34 З, включеного через блок живлення 2, до початку занурення шпінделя в шлак.

Після занурення шпінделя (на 10—12 мм) деяка кількість шлаку налипає на шпіндель і як би збільшує його масу, крім того, в результаті вібрацій виникає тертя з сусідніми шарами рідкого шлаку, ніж викликається порушення резонансу. Останнє тим більше, чим більше в'язкість шлаку, амплітуда ж коливання, навпаки, із збільшенням в'язкості шлаку зменшується. Про величину в'язкості судять за масштабом загасання амплітуди коливання.

Перед визначенням в'язкості віскозиметр градуують по еталонних рідинах, в'язкість яких точно відома. Таке градуювання дозволяє за свідченнями потенціометра 4 побудувати графік в координатах; вісь абсцисс— в'язкість, вісь ординат — з. д. з. За допомогою цього графіка встановлюють в'язкість при випробуванні натуральних шлаків.

Тугоплавка шлаку (витрата тепла на розплавлення 1 кг шлаку) оцінюється на спеціальних лабораторних установках з калориметрами.

Температуру плавлення визначають різними методами, частіше за все розплавляючи шлаки в лабораторних мікропечах. Виявлення оптимальних властивостей шлаків, їх хімічного складу по пробах, витягнутих з доменної печі, дозволяє вирішувати багато питань, що мають значення як для теорії, так і для практики виплавки чавуну в доменних печах.

При дослідженнях ходу шлакоутворення в доменних печах вивчаються наступні найважливіші питання: заславши і властивості первинних шлаків з підвищеним вмістом магnezії і їх вплив на газодинаміку в стовпі шихти; оптимальний шлаковий режим при виплавці особливо чистих по сірці високоякісних передільних чавунів; хід процесів шлакоутворення і властивості фторвміщуючих доменних шлаків; вплив лугів на хід шлакоутворення і властивості шлаків; здатність, а також фактичні і рівноважні коефіцієнти розподілу сірки, що знесірчує, при роботі на шлаках різної основності, оптимізація шлакового режиму в умовах форсованого ведення доменної плавки; методи оцінки рідиннотекучості і дренажної здатності доменних шлаків; взаємозв'язок між властивостями доменних шлаків і тепловим станом сурми доменної печі.

Вивчення накопичених фактичних експериментальних даних зі всіх відзначених питань дозволяє розробляти методи форсованого ведення доменної плавки при забезпеченні високої якості металу і мінімальної питомої витрати коксу на виплавку чавуну.

13. ГАРЯЧЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Гаряче моделювання проводиться в малих конвертерах місткістю від декількох до сотень кілограмів шляхом продування рідкого $\text{Fe} - 3$ розплаву киснем. Встановлено, що достатня ідентичність процесу продування в малих агрегатах і в промислових конвертерах забезпечується при дотриманні геометричної подібності і однакових значеннях основних параметрів дуттового (інтенсивність продування, конструкція фурми) і шихтового (тип присадок, час введення) режимів плавки. Деяка відмінність у величинах теплових втрат в агрегатах різної місткості може бути нейтралізований шляхом індукційного нагріву металу в моделі або перегріву чавуну перед продуванням.

Зручно використовувати при гарячому моделюванні як конвертер переобладнану лабораторну індукційну піч. Такі агрегати застосовують в початковій стадії досліджень технологічного характеру, результати яких доцільно потім перевіряти на напівпромислових агрегатах. Для вивчення структури ванни, реакційної зони, окремих фізико-хімічних явищ у ванні використовують спеціальні моделі.

Певну інформацію про форму і розміри реакційної підфурменної зони можна отримати шляхом «просвічування» ванни, що продувається, за допомогою бетатрона. Проте цей метод дає вельми наближені результати. Параметри реакційної зони виявляються також по контуру оплавлення спеціально встановлюваних перед продуванням в конвертер (в районі зони) металевих ґрат

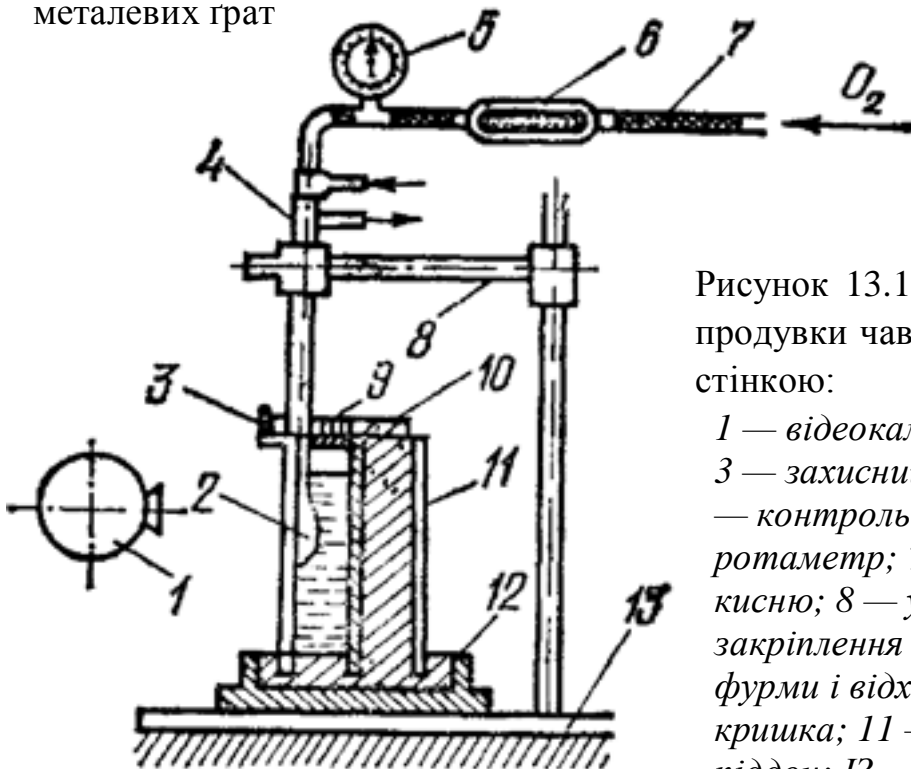


Рисунок 13.1 – Схема установки для продувки чавуну в тиглі з прозračною стінкою:

1 — відеокамера; 2 — реакційна зона; 3 — захисний козырек; 4 — фурма; 5 — контрольний манометр; 6 — ротаметр; 7 — шланг для подачі кисню; 8 — устрій для закріплення фурми; 9 — отвір для фурми і відходящих газів; 10 — кришка; 11 — кварцевий тигель; 12 — піддон; 13 — стелд

і стрижнів. Після короткочасного продування рідкий метал виливають з конвертера, потім оглядають залишки ґрат (стрижнів). Таким чином одержують інформацію про форму і розміри внутрішньої високотемпературної частини реакційної зони.

Якнайповніші дані про реакційну зону і що відбуваються в ній процеси дає недавно розроблений в ДМетІ метод її візуалізації шляхом продування металу в тиглі (конвертері) з прозорою кварцовою стінкою через фурму, встановлену поблизу цієї стінки (мал. 13.1). Для фіксації процесів застосовуються швидкісна кінозйомка і фотографування. На основі цього методу отримані нові дані про структуру реакційної зони, встановлені наявність в ній первинної високотемпературної і вторинної частин, характер циркуляційних потоків. Метод придатний для вивчення процесів взаємодії реакційних зон (багатоструменеве продування), характеру газовиділення у ванні, механізму виникнення сплесків і інших явищ.

При вивченні характеру газовиділення на периферії ванни і її структури у вказаній області застосовують модель із звичайним центральним розташуванням фурм; в стінці конвертера в цьому випадку роблять вікно з прозорого кварцу (методика СМІ). Інші вікна (відкриті або закриті прозорим матеріалом) в шлемовій частині конвертера використовують для спостережень і зйомки явищ, що протікають в верхній частині ванни.

З метою вивчення зміни інтенсивності газовиділення з ванни по її радіусу (горизонталі) застосовують іноді багатокамерні (звичайно двокамерні) тигли-конвертери (рис.13.2), що мають вгорі ванни розділові перегородки і загальну кришку з отворами для виходу газів. При цьому кисень вводиться через фурму тільки в одну камеру, а гази відводяться окремо з кожної камери. Моделі приблизно такій же конструкції можна застосовувати і для вивчення складу первинного шлаку, що утворюється в різних ділянках ванни. Вміст первинної реакційної зони при продуванні зверху можна відбирати за допомогою спеціальних відносно легкоплавких керамічних або швидко прогораючих вставок, встановлених в днищі лабораторного конвертера. Незабаром після початку продування в нижній частині конвертера утворюється (випалюється) отвір певних розмірів, з якого видувається газорідинна суміш; конденсуючі частинки цієї суміші гартуються в спеціальній рідині, розташованій під днищем конвертера. Найстабільніші результати при цьому досягаються у разі використання конвертерів проточного типу, що дозволяють підтримувати постійний середній склад металу у ванні (рис. 13.3).

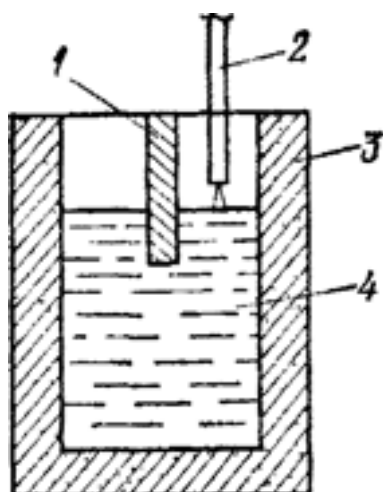


Рисунок 13.2 – Схема
двухкамерного тигля-конвертера:
1 — перегородка; 2 — фурма; 3 —
тигель; 4 — ванна

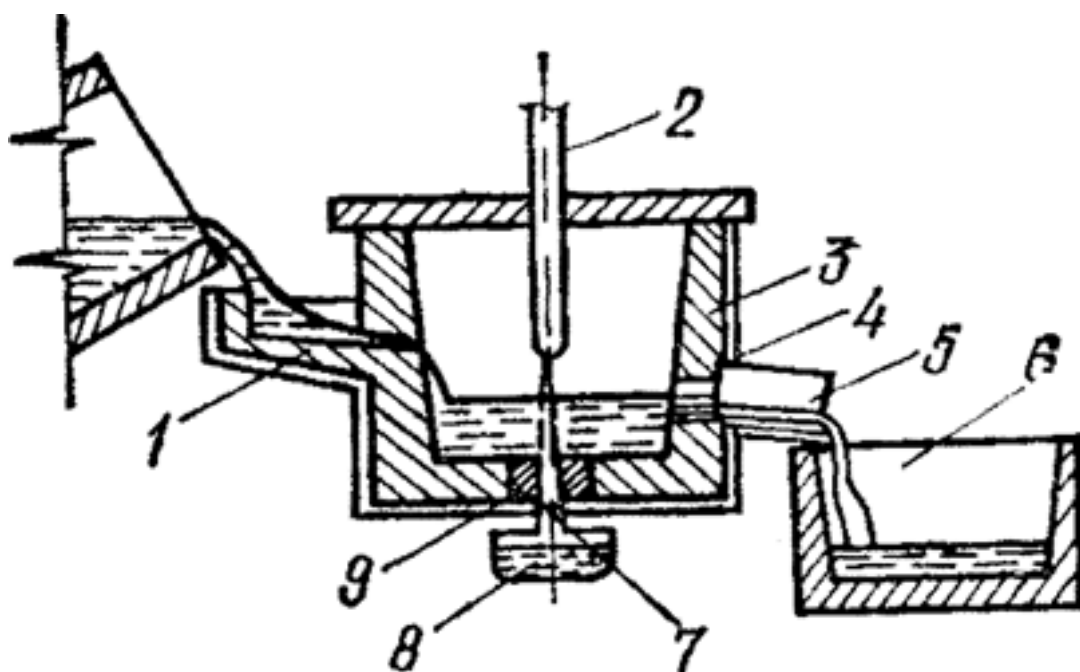


Рисунок 13.3 – Схема установки для уловливания продуктов
первичной реакционной зоны

1 — носок; 2 — фурма; 3 — магнетитовое набивание; 4 — проточный тигель;
5 — вилливый носок, 6 — копильник; 7 — отвір; 8 — пробовідбірник; 9 —
магнетитовая плита

У ряді робіт встановлено, що продування окислювальним газом в промислових агрегатах супроводиться ежекцією металу в струмінь, дробленням і утворенням крапель, які є основними переносниками кисню і енергії від дуття до ванни. У зв'язку з цим використовується ряд методик дослідження процесу взаємодії крапель металу з окислювальним газом.

Відносно крупні частинки розміром порядку 0,1—3 мм, типові для установок струменевого рафінування і периферійних ділянок реакційної зони, підвищуються в електромагнітному полі і обдуваються кисневмісним газом. Після гарту окислених крапель досліджують їх склад і структуру.

При вивченні взаємодії більш дрібних крапель (частинок) діаметром порядку 0,1 мм, типових для внутрішніх ділянок первинної реакційної зони, добрі результати дає метод треків. В цьому випадку краплі або тверді Be—C частинки дозований вводяться зверху в спеціальній установці в потік нагрітого окислювального газу, наприклад кисню, де відбувається їх окислення і горіння. Газ в установці нагрівається за допомогою спеціальної печі з силітовими стрижнями і потім поступає в кварцову трубку, куди і вводяться частинки металу. Під трубкою укріплена мірна лінійка з підсвічуванням. Треки частинок, що горять, фотографують через обертається диск-обтюратор з отворами. Після цього досліджуються струмені і склад згорілих частинок. В лабораторних конвертерах застосовують звичайно такі ж методи відбору проб, визначення температури, рівня ванни, як і в повномасштабних агрегатах» але виміри проводять частіше.

Промислові дослідження включають проведення спочатку окремих плавок, а потім серій (кампаній) за досвідченою технологією або спеціальних плавок для вивчення різних явищ, що протікають в конвертері, за допомогою звичайної або особливої апаратури. Зміст досвідченої технології визначається основній поставленій за мету дослідження. Конкретними задачами промислових досліджень можуть бути пошук принципово нових варіантів процесу, конструкцій конвертерів, типів пристроїв для введення окислювача (фурм, днищ), дугтових і шлакових режимів, методів введення основних шихтових матеріалів і флюсів; випробування нових приладів для контролю ходу продування, матеріалів, вогнетривів; отримання нових даних для поглиблення знань про закономірностей конвертерних процесів.

В промислових дослідженнях конвертації застосовують різні методи.

Хронометраж плавок. При використуванні цього методу фіксується час окремих операцій плавки: завантаження шихти, продування і ін. Балансові плавки проводяться з точним зважуванням, вимірюванням об'єму, відбором проб і аналізом всіх висхідних матеріалів, продуктів і втрат (стали, шлаку, газів, пилу, викидів і ін.). В конвертерних газах у ряді випадків виділяється пилоподібна складова, що піддається фракційному і мікроскопічному аналізу. В шлаку визначають зміст «корольків» (крапель металу). За допомогою спеціальних пристосувань уловлюють винесення і викиди.

Візуальні спостереження ведуться за ходом всіх або окремих операцій плавки, за явищами, супроводжуваними продування (викиди, винесення, вибивання газів, факела і ін.), за футеровкою конвертера до і після плавки

(серії плавок), станом ванни, шлаку після продування, отвору, що закінчується з нього струмені і ін. Встановлені особливості фіксуються в спеціальному журналі

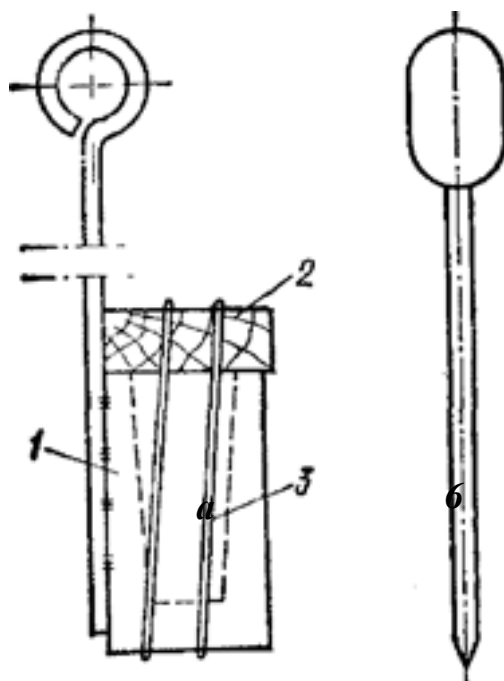


Рисунок 13.4 – Пробниці для відбору проб металу:

1 — пробниця; 2 — дерев'яна кришка; 3— мідний дріт

Фото- і кінозйомка виконується для більш точної фіксації явищ. Рідкі стали, шлаки, факел, а також гарячий футерівку необхідно знімати з світлофільтрами, звичайно синіми. Для встановлення вимагаються витримки і діафрагми бажано виконувати пробні зйомки.

Відбір проб металу, шлаку здійснюється для визначення їх хімічного складу, вміст неметалічних включень в металі, структурно-фазового аналізу. Проби відбирають ложками або спеціальними пробницями. Для відбору проб на неметалічні включення і гази з конвертера і ковша використовують пробниці, закриті дерев'яною або керамічною пробкою (мал. 13.4, а) і забезпечуючі швидке заморожування металу. Пробка прикручується мідним дротом, який в рідкому металі швидко розплавляється. Після цього кришка спливає, і пробниця на необхідній глибині заповнюється рідким металом. Час відділення кришки регулюється шляхом підбору діаметра мідного дроту.

Для узяття невеликих проб металу у ряді випадків застосовують трубки з кварцу або тугоплавкого скла. При цьому на одному кінці трубки скло розігрівається і видувається місткість, потім в трубці створюється вакуум

і інший кінець її запаюється (мал. 13.4, *би*). Після занурення в метал цей кінець розплавляється, метал затікає в трубку і твердне. Для витягання проби трубку розбивають. Найбільш просто відбирати проби металу і шлаку з конвертера перед продуванням або після продування, тобто при повалці конвертера. Проте вони недостатньо точно характеризують склад фаз і стан ванни, що продувається.

Для відбору проб металу і шлаку з конвертера безпосередньо в ході продування дослідники застосовують пристрої, що складаються з металевого троса, сталеві штанги з однією або декількома пробницями, розташованими на різних рівнях по висоті, і обважнювачем на кінці з металу більшої густини, ніж сталь. Останнє забезпечує занурення штанги у ванну. Для опускання і підйому штанги використовується спеціальний, але простий механізм. Таким шляхом можна вивчати структуру і склад ванни на різних горизонтах, її рівень.

Останнім часом в промислових конвертерах для звичайного контролю складу і температури ванни в ході продування застосовують водоохолоджувані зонди (подібні фурмі), які періодично вводять у ванну через отвір в кесоні. Щоб проби і дані про температуру були представницькими, тобто характеризували середні параметри ванни, що вимірюються, необхідно правильно вибрати положення зонда. По величині температури металу (ликвідуса, солідуса), що кристалізується, можна приблизно визначити і вміст вуглецю в ньому.

Вимірювання температури необхідне для визначення температурного режиму плавки і вивчення тепло-обмінних процесів у ванні. Короточасні виміри температури рідкого металу (шлаку) перед продуванням або при повалках конвертера проводять звичайними термопарами занурення. Для тривалих безперервних вимірів температури металу в конвертері або у футеровці (для фіксації температурних полів) застосовують термопари, закладені в кладку агрегату. При вимірах температури рідкого металу використовують як звичайні кварцові, так і високостійкі ковпачки з диборида цирконію. Вони витримують без заміни 10—20 плавок. Наконечник термопари дещо виступає з футеровки, місце її установки підбирають таким, щоб різниця свідчень даної термопари і термопари занурення була мінімальною. Температурні поля у футеровці рекомендується вивчати за допомогою блоків термопар. Для реєстрації температур використовують переносні самописні потенціометри. Останнім часом, як вже наголошувалося, для періодичних вимірів температур металу в ході продування застосовують водоохолоджувані зонди.

Деяку наближену інформацію про температуру верхніх шарів ванни можна отримати шляхом виміру її оптичним пірометром, що вводиться в

конвертер за допомогою водоохолоджуваної труби-фурми. З метою захисту установки від бризок металу застосовується віддув аргоном або азотом. Для виміру температур в первинній реакційній зоні оптичний пірометр, встановлюють у верхній частині продувочної кисневої фурми.

Вимірювання рівня ванни особливо важливо при вивченні механізму винесення і викидів. Механічні пристрої придатні лише для дискретних вимірів. В цілях безперервного стеження за рівнем ванни в динамічних системах автоматизації контролю і управління киснево-конвертерною плавкою виміряють інтенсивність шуму в певному діапазоні частот (близько 1000 Гц) і вібрації конвертера. У міру підйому рівня ванни інтенсивність сигналу, пов'язаного з процесами горіння і взаємодії струменя кисню з металом, знижується. При невеликому вспучуванні ванни (шлакометалевої емульсії) найточнішу інформацію про рівень ванни дає акустична, а при значному — вібраційна характеристика.

Істотна інформація про рівень ванни може бути отриманий при безперервному контролі температури води, охолоджуючої фурми (росте з підйомом ванни), а також вимірюванні електропровідності ванни на ділянці фурма — ванна. В останньому випадку достатньо чітко фіксується момент наближення ванни до фурми і затоплення фурми.

Вивчення процесів масопереносу проводиться шляхом введення у ванну добре розчинних в залозі і металів (мідь, нікель) або ізотопів фосфору, що не окислюються, сірі. Їх поміщають в певні ділянки ванни в спеціальних капсулах або в шматках лому, а з інших ділянок відбирають проби рідкого металу, які потім досліджують.

При вивченні окремих явищ в конвертерній ванні виникає необхідність в отриманні спеціальної інформації за допомогою принципово нових або відомих, але видозмінених методів. Останнім часом починають використовувати (в основному в лабораторних дослідженнях) проникаючі випромінювання, лазери, виміряють фізичні властивості ванни і т.д. Мабуть, надалі ці методи застосовуватимуться і у виробничих умовах.

Щоб зменшити вірогідність аварійних ситуацій і запобігти зниженню продуктивності агрегатів в промислових дослідженнях при істотних змінах технології і конструкцій, у ряді випадків проводять проміжні *напівпромислові випробування* в конвертерах місткістю 10—30 т.

14. ОБ'ЄКТИ І МЕТОДИ КОНТРОЛЮ В ХОДІ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОЦЕСУ

Сталеплавильна ділянка ОТК має наступні контрольні крапки: по

контролю якості шихтових матеріалів; на конвертерах, мартенівських, електросталеплавильних печах по контролю технології виплавки сталі; в розливному прольоті по контролю за розливанням сталі; у відділенні підготовки складів по контролю за наборкою складів під розливання сталі; на маркіровці злитків; на складі злитків.

На деяких заводах встановлюють крапки по контролю за зберіганням і витратою легованих відходів, розкислювачів, за експлуатацією і стійкістю виливниць.

Контроль технології мартенівської плавки періодів завалення, заливки чавуну, рудного і чистого кипіння, температури металу і його окисленості, розкислювання в печі, випуску і розкислювання металу в ковші здійснюється постійно майстром виробництва, сталеваром і контролером ОТК, а також періодично — контрольним майстром ОТК, начальником ділянки ОТК, начальником цеху, його заступниками і начальниками змін. Цими ж особами здійснюється контроль ведення плавки в конвертерах і електропечах.

Контроль технології розливання плавки здійснюється постійно розливальниками, майстрами розливання, контролером ОТК, періодичний — контрольним майстром ОТК, заступником начальника цеху по розливанню, начальником зміни, начальником цеху.

Контроль за дотриманням теплового режиму плавки в конвертерах, мартенівських і електросталеплавильних печах систематично здійснюється сталеваром, дистрибуторщиком, майстром виробництва, змінними майстрами газового господарства, періодично — заступником начальника цеху по ремонтах і експлуатацією сталеплавильних агрегатів, старшими майстрами і теплотехнічною лабораторією.

Основним технологічним документом є паспорт плавки. В паспорт плавки заносяться всі основні технологічні параметри, що характеризують процес плавки, розливання сталі і використані на плавці матеріали. Для заповнення паспорти використовують сертифікати, невідгідні, дані хімічного аналізу металу, виміри температури і безпосередньо спостереження майстрів виробництва, розливання і контролерів ОТК.

14.1. Контроль хімічного складу матеріалів

В сучасних конвертерних, мартенівських і електросталеплавильних цехах існує пневматична пошта, що дозволяє протягом короткого проміжку часу доставляти відібрані проби (металу і шлаку) в експрес-лабораторію цеху або безпосередньо в центральну хімічну лабораторію для виробництва їх хімічного аналізу.

Проби металу відбирають підручних сталевара ложкою (через оглядові отвори вікон завалень сталеплавильних і електросталеплавильних печей або через похилу горловину конвертера) в пробниці. З них проба металу

14.2. Способи вимірювання температури розплавів і футеровки сталеплавильних агрегатів

Температуру розплавів і футеровки сталеплавильних агрегатів заміряють за допомогою термоелектричних термометрів (термопар) і оптичних пірометрів. В табл. 14.1 дані характеристики стандартних термоелектричних термометрів з металевими термоэлектродами.

Таблиця 14.1 Стандартні робочі термометричні термометри з металевими термоэлектродами

Тип термоелектричного термометра опору	Матеріал термоелектродів (+/-)	Позначення градуювання	Діапазони вимірювань при тривалому застосуванні, $\pm^{\circ}\text{C}$	Межа вимірювання, що допускається, при короткочасному застосуванні, $^{\circ}\text{C}$
Термопара платінородій-платинова (ТПП)	Платінородій (10 % родію) – платина	ПП	0 – 1300	1600
Термопара платіно-родієва (ТПР)	Платінородій (30 % родію) – платінородій (6 % родію)	ПР 30/6	0 – 1600	1800
Термопара вольфрам-ренієва (ТВР)	Вольфрамрений (5 % ренію) – вольфрамрений (20 % ренію)	ВР 5/20	0 – 2200	2500
Термопара хромельалюмелієва (ТХА)	Хромель – алюмель	ХА	0 – 1000	1300
Термопара хромелькопедєва (ТХК)	Хромель – копель	ХК	0 – 600	800

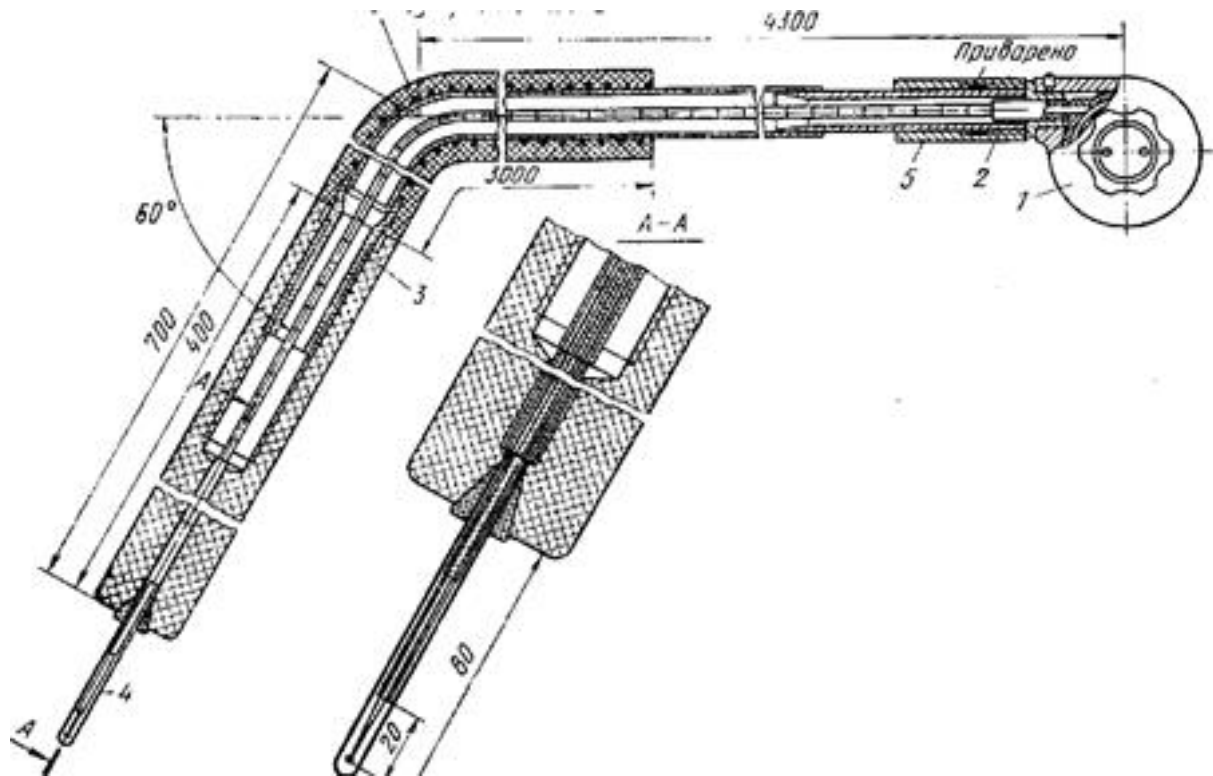


Рисунок 14.1 – Термопара разового виміру

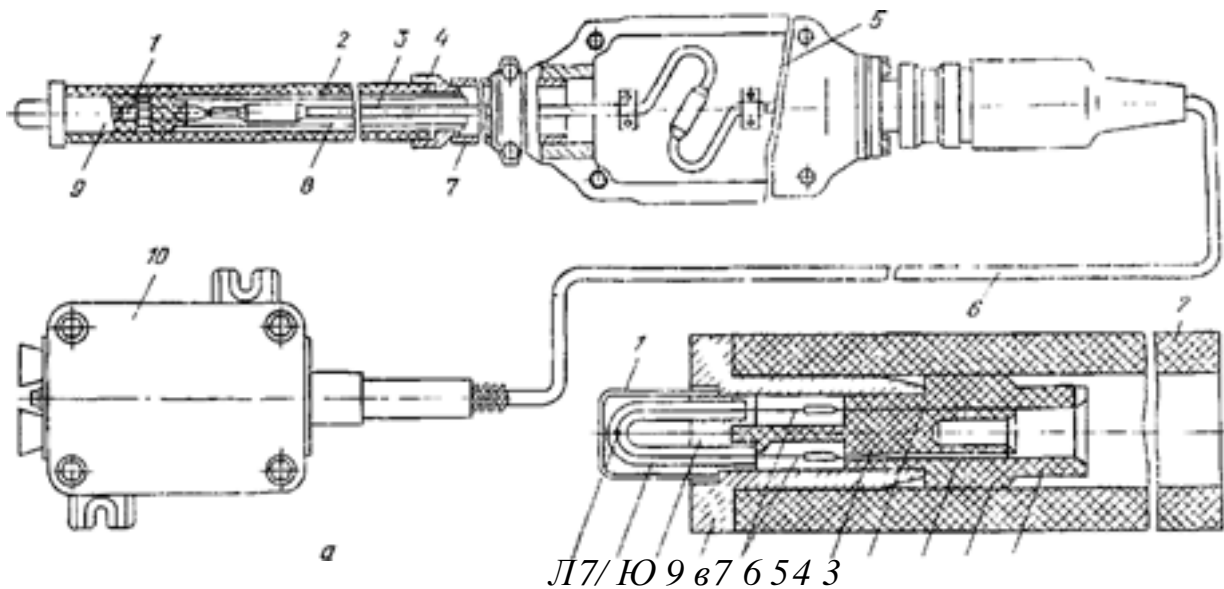


Рисунок 14.2 – Термоелектричний термометр типу ТВР-7175 із змінними блоками

14.2.1. Вимір температури рідкої сталі

Разові (короткочасні) виміри температури здійснюються зануренням термопар в рідкий метал через вікна завалень мартенівських і електросталеплавильних печей або через горловину кисневих конвертерів при їх повалке.

Термопара разового виміру (рис.14.1) є металевою трубою 5 діаметром 30 мм, на різьблення зовнішнього кінця якій накручується катушка з роз'ємною вилкою. На катушці намотані вольфрам-вольфрамєнієві або вольфрам-вольфраммолибденові дроти (електроди). Електроди, на які нанизані вогнетривкі намиста, пропускають через трубу, на кінці якої знаходиться корундовий циліндр 3 з отвором для кварцового наконечника. Робочий кінець термопар є спаєм різних термоелектродов і вводиться в кварцовий ковпачок 4. На трубу термопар намотується звичайний дріт; при вимірі температури металу дріт ошлаковує. Час виміру 30-35 с.

Більш прогресивний метод разового виміру температури рідкої сталі здійснюється термоелектричними термометрами із змінними блоками типу ТВР-7175. Термоелектричний термометр (рис.14.2) складається із змінного блоку 9, наконечника жезла 8, власне жезла 7 і сполучних коробок 5 і 10.

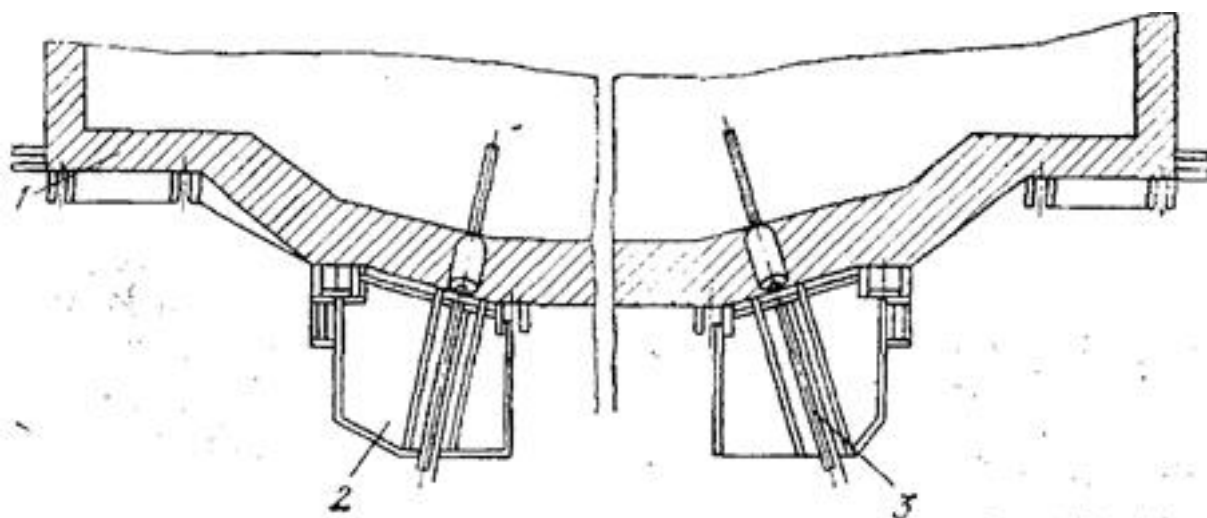
Змінний блок (рис. 14.2, б) включає вимірювальну головку із захисним ковпачком 1, запресовану в картонну гільзу 2.

Вимірювальна головка складається з керамічного корпусу 9 і термоелемента 7, є пластмасовим вкладишем 4 з укріпленою в ньому и-образной захисною трубкою 11, усередині якої розміщується термопара з вольфрамєнієвих сплавів ВР-5 і ВР-20 з градуировочной характеристикою ВР 5/20 (ГОСТ 3044—77). Вільні кінці термопар сполучені з кінцями компенсаційних дротів 5 я 6. Простір між II-образной трубкою і внутрішніми стінками керамічного корпусу заповнений вогнетривкою масою 10. Картонна гільза призначена для теплового захисту вимірювальної головки від дії розплавленого металу під час вимірювання. Жезл термометра виконується із сталеві газові труби діаметром 3/4 дюйма. Термометр із змінним блоком типу ТВР-7175 виміряє температуру в межах 1400—1800°C, тривалість виміру 8с, час встановлення свідчення 5 з. Всі термоелектричні термометри працюють з самописними приладами типу КСП-3, КСП-4 (контактний самописний потенціометр).

14.2.2. Безперервний вимір температури

В період доведення плавки на ряді металургійних заводів і комбінатів проводиться безперервний вимір температури металу по ходу процесу.

Термоелектроди платинородиевої термопари типу ТПР1418М (градуювання ПР 30/6) поміщають у водоохолоджувану фурму з мідним наконечником завдовжки 250—300 мм, яку вводять в піч за допомогою лебідки з дистанційним управлінням електроприводу через амбразури в зведенні біля задньої стінки печі (рис.14.3). Амбразури забезпечені повітряним поддувом, а фурми охолоджуються водою під тиском 0,7—1,0 МПа. Для запобігання робочого спаю термопари від руйнування в отвір фурми вставляється спеціальний вогнетривкий тришаровий наконечник із зовнішнім чохлам з прозорого кварцу. Тривалість виміру залежить від стійкості тришарового наконечника, яка досягає 2,5 ч. Вимірювання починають після повного розплавлення і розчинення присадок.



Мал. 14.3. Установка термопари постійного виміру:

1— задня стінка печі; 2 — майданчик для монтажу і обслуговування;
3 — висувна фурма з термопарою

14.2.3. Візуальне визначення температури металу

Здійснюється шляхом зливу тонким струменем рідкого металу з ложки на чисту металеву плиту. Гаряча сталь розливається у вигляді тонкого коржика з утворенням темної плями на застигаючому коржику в місці падіння

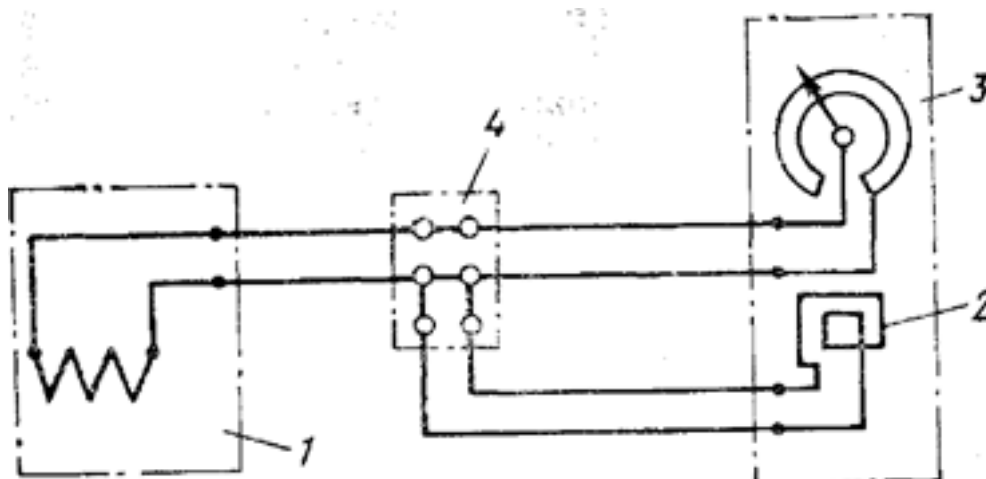
струменя. При сливі гарячої сталі на чавунну плиту коржик приварюється до останньої; на ложці гаряча сталь при сливі не залишає ніяких слідів.

Контроль ступеня нагріву металу перевіряється за допомогою занурення металевого шомполу із сталі марки СтЗсп діаметром 32 мм, завдовжки 4—5 м на визначене для кожної марки сталі, що виготовляється, час у ванну. Занурення шомполу проводиться через середнє вікно завалення. По виду оплавленого кінця шомполи судять про ступінь нагріву металу. При недостатньому нагріві металу шомпол оплавляється лише з поверхні, приймаючи конічну форму. При гарячому металі кінець шомполу оплавляється майже під прямим кутом.

14.2.4. Вимірювання температури футеровки сталеплавильних агрегатів термодарами, радіаційними пірометрами, шомпольними термозондами

Температуру зведення робочого простору виміряють при розігріванні печей хромель-алюмелевими термодарами типа (ТХА) і радіаційними пірометрами.

Температуру поверхні насадок регенераторів визначають за допомогою радіаційних пірометрів, які вставлені в амбразури стінок торців. Амбразури обдуваються повітрям для захисту оптики пірометра. Потужність випромінювання сприймається теплочувствительним елементом. Для концентрації енергії випромінювання на теплочувствительний елемент застосовується оптична система. Як теплочувствительного елемент найбільше розповсюдження отримали термоелектричні приймачі, виконані у вигляді, декількох мініатюрних термодар, сполучених послідовно (для збільшення термо-э.д.с). В радіаційних пірометрах «Рапір» (рис.14.5), окрім телескопа 1 ТЕРА-50, як вимірювальний прилад застосовують потенціометр 2, розміщений з корегуючим реостатом 3.



Мал. 14.5. Схема радіаційного пірометра

15. Контрольно-вимірювальні прилади і апаратура

Контрольно-вимірювальні прилади, вживані для контролю сталеплавильних процесів, можна розділити на:

- 1) прилади контролю витрати (газу, повітря, пари, кисню, мазуту);
- 2) прилади контролю тиску (газу, повітря, пари, кисню, мазуту, тиску і розрідження в робочому просторі печі);
- 3) прилади контролю температури (рідкої сталі, зведення, насадок, свині);
- 4) прилади контролю окисленості металу;
- 5) прилади контролю складу продуктів згоряє.

До апаратури відноситься вся електроапаратура (автоматичні перемикачі, електронні реле, тиристори, двигуни, виконавчі механізми і т. д.).

Контрольні питання

1. Які задачі покладені на відділ технічного контролю на металургійному підприємстві?
2. Розкажіть про контроль що поступають в сталеплавильні цехи шихтових матеріалів.
3. Розкажіть, як здійснюється контроль при виплаві сталі в сталеплавильних цехах.
4. Як здійснюються виміри температури рідкої сталі?
5. Які прилади в сталеплавильному виробництві служать для контролю температури?

Основна література

1. Линчевский Б.В. Техника металлургического эксперимента.- М.: Металлургия, 1967.-344 с.
2. Линчевский Б.В. Техника металлургического эксперимента.- М.: Металлургия, 1979. 256 с.

Додаткова література

1. Физико-химические методы исследования металлургических процессов / С.И.Филиппов, П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, М.Г. Крашешнников.- М.: Металлургия, 1968.-551 с.
2. Физико-химические методы исследования металлургических процессов / П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, М.Г. Крашенинников и др.- М.: Металлургия, 1988.-511 с.
3. Гречко А.В., Нестеренко Р.Д., Кудинов Ю.А. Практика физического моделирования на металлургическом заводе - М.: Металлургия. 1976,- 224 с.
4. Марков Б.Л., Кирсанов А.А. Физическое моделирование в металлургии,- М.: Металлургия, 1984.- 119 с.
7. Основы научных исследований в черной металлургии / В.И. Баптизманский, Г.А. Воловик, Б.И. Емлин и др. // Под общ. ред, Ю.Н. Яковлева,- Киев- Донецк; Вища школа, 1985.- 205 с.
8. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента- М.: Мир, 1972.- 382 с.
9. Ковшов В.Н. Постановка инженерного эксперимента- Киев-Донецк: Вища школа, 1982.-120 с.
10. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Условия подобия при высокотемпературном моделировании конвертерных процессов. Аэрогидродинамическое подобие // Известия вузов. Черная металлургия,- 1997,-№8,- с.26-31.
11. Пантейков С.П. О методике холодного моделирования гидродинамики конвертерной ванны при верхней продувке // Известия вузов. Черная металлургия.-2001.- №3.-с. 14-48.
12. Капустин Е.А. К моделированию продувки жидкости кислородом // Известия вузов. Черная металлургия.- 1972.- №11.- С. 186, 187.
13. Казанцев И.Г. Механгоса газовой струи в бессемеровской ванне // Сталь.- 1940.-№1.-с. 16-1.8.
14. Баптизманский В.И., Паниотов Ю.С. О холодном моделировании

- гидродинамики сталеплавильного конвертора // Известия вузов. Черная металлургия,- 1989-№6 .С.26-30.
15. Яковлев Ю.Н. Физическое и математическое моделирование сталеплавильных процессов // Вопросы теории и практики сталеплавильного производства: Науч, тр. ММИ.- М.: Металлургия, 1991.- С.32-44.
16. К вопросу моделирования гидродинамики конверторной ванны при донной продувке / В.И. Баптизманжий, Ю.Н. Борисов, А.М. Лонский, В.И. Трубавин // Известия вузов. Черная металлургия.- 1988.- № 8.- с.24-27.
17. Гидродинамика ванны и колебания корпуса конвертера донного дутья / В.И. Баптизманский, В.И., Трубавин, А.М., Лонский и др. // Известия вузов. Черная металлургия- 1988.-№ 10.- с.17-20.

**Перелік навчальних та інших посібників,
методичних вказівок та технічних засобів**

1. Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни «Техніка високотемпературного експерименту» освітньо-наукової програми вищої освіти (підготовка докторів філософії) зі спеціальності 136 “Металургія” / Укладач: Пантейков С.П.- Кам’янське: ДДТУ, 2016.- 24 с.
2. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Техніка високотемпературного експерименту» (розділ “Позапічна обробка”) освітньо-наукової програми вищої освіти (підготовка докторів філософії) зі спеціальності 136 “Металургія” / Укладач: Пантейков С.П.- Кам’янське: ДДТУ, 2016.- 11 с.
3. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Техніка високотемпературного експерименту» (розділ “Виробництво сталі”) освітньо-наукової програми вищої освіти (підготовка докторів філософії) зі спеціальності 136 “Металургія” / Укладач: Пантейков С.П.- Кам’янське: ДДТУ, 2016.- 32 с.
4. Методичні вказівки по самостійному вивченню дисципліни «Техніка високотемпературного експерименту» освітньо-наукової програми вищої освіти (підготовка докторів філософії) зі спеціальності 136 “Металургія” / Укладач: Пантейков С.П.- Кам’янське: ДДТУ, 2016.- 18 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Конспект лекцій з дисципліни “Техніка високотемпературного експерименту”
освітньо-наукової програми вищої освіти (підготовка докторів філософії) зі
спеціальності 136 “Металургія”

Укладач: Пантейков Сергій Петрович

Підписано до друку _____ 2016 р.
Формат 60x84 ¹/₁₆. Обсяг _____ др. арк.
Тираж _____ прим. Замовлення № ____
51918, м. Кам'янське,
вул. Дніпробудівська, 2