

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних та самостійних  
робіт з навчальної дисципліни  
«Сучасні методи позапічної обробки сплавів», для  
студентів спеціальності  
G10 Металургія

Харків 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних та самостійних  
робіт з навчальної дисципліни  
«Сучасні методи позапічної обробки сплавів»,  
для студентів спеціальності  
G10 Металургія

Затверджено  
редакційно-  
методичною  
радою  
університету,  
протокол № 2 від  
26.06.2025

**Методичні вказівки** до виконання лабораторних та самостійних робіт з навчальної дисципліни «Сучасні методи позапічної обробки», для студентів спеціальності G10 Металургія / Укл. Петрова Ю.В. – Харків, НТУ «ХПІ», 2025. – 13 с.

Укладачі: Ю.В. Петрова

Рецензент проф. Акімов О.В. Кафедра ливарного виробництва

## Лабораторна робота №1

### **Перемішування металу в ковші.**

#### **Мета роботи**

Навчитися визначати основні етапи, принципи та технології перемішування металу в ковші.

#### **Теоретичні відомості**

Дослідження процесів, що відбуваються під час продування сталі розливочного ковша інертним газом є дуже актуальною темою в сучасній металургії. Завдання отримання високоякісної сталі або сплаву, придатних для виготовлення відповідальних виробів, зводиться до розробки такої технології виплавки, розкислення і заключного етапу обробки, які можуть забезпечити мінімальне залишковий вміст шкідливих домішок, газів і неметалевих включень.

Ця тема є ключовою для розуміння гідродинаміки та кінетики металургійних процесів, що відбуваються в ковші.

Суть процесу: Перемішування – це штучна інтенсифікація циркуляції рідкого металу в ковші, яка забезпечується переважно продуванням інертним газом (Аргоном) через донні або бокові пористі елементи. Аргон (як хімічно інертний газ) використовується, щоб уникнути небажаних реакцій з металом.

Механізм (Газліфтний ефект): бульбашки Аргону, спливаючи, створюють значну різницю в густині металу між зоною продування та рештою об'єму. Ця різниця генерує потужний висхідний потік у зоні продування і низхідний потік уздовж стінок, формуючи ефективну циркуляційну петлю, яка охоплює весь об'єм металу.

Критичні функції:

1. Термічна гомогенізація: Зменшення перепаду температур у металі до 1-3°C що вкрай важливо для забезпечення стабільного процесу розливання.
2. Хімічна гомогенізація: Прискорення розчинення та рівномірного розподілу дорогих феросплавів, введених для коригування складу.
3. Кінетична інтенсифікація: Максимальне прискорення міжфазних реакцій (особливо десульфуратції) між металом і шлаком.
4. Спливання включень: Бульбашки Ar діють як носії, на поверхні яких адсорбуються дрібні неметалеві включення. Після спливання бульбашок ці включення переходять у шлак.

## Розрахунок часу гомогенізації

Метою продування Аргоном є досягнення **часу гомогенізації** ( $t_h$ ), який можна оцінити за формулою:

$$t_h = K \cdot \frac{W}{V_{Ar}^{0.8}}$$

де:

- $W$  — маса металу, т;
- $V_{Ar}$  — витрата Аргону, м<sup>3</sup>/хв;
- $K$  — емпіричний коефіцієнт (для ковша з донним продуванням  $K \approx 10 - 15$ ).

**Умова:** Розплав сталі масою **160 тонн** знаходиться в ковші. Планується продування Аргоном через донну пористу пробку.

### Завдання:

1. Розрахуйте мінімальний час продування ( $t_h$ ) для повної гомогенізації, якщо використовується витрата Аргону **0.35 м<sup>3</sup>/хв** (прийміть  $K = 12$ ).
2. Визначте, наскільки зменшиться час гомогенізації, якщо витрату газу збільшити до **0.5 м<sup>3</sup>/хв**.

### Контрольні питання:

1. Поясніть фізичний принцип газліфтного ефекту та його роль у створенні циркуляційних потоків металу в ковші.
2. Назвіть три основні технологічні функції перемішування Аргоном. Як цей процес впливає на неметалеві включення?
3. Чому для перемішування використовують виключно інертні гази (як правило, Аргон)? Що відбудеться, якщо для перемішування використати, наприклад, повітря?

## Лабораторна робота №2

### Рафінування сталі рідкими шлаками в ковші

#### Мета роботи

Розглянути основні технології рафінування сталі рідкими шлаками. Технологія рафінування сталі в ковші рідким синтетичним шлаком.

#### Теоретичні відомості

Рафінування сталі рідкими шлаками в ковші Фокусується на термодинаміці та хімії очищення сталі від шкідливих домішок, що погіршують механічні властивості та корозійну стійкість.

Рафінування – це процес видалення домішок шляхом їх перерозподілу між рідким металом та активним рідким шлаком. Ефективність визначається коефіцієнтом розподілу домішки  $L = (\%X)_{\text{шлак}} / [\%X]_{\text{метал}}$ .

Вимоги до синтетичного шлаку:

- Лужність і сульфідна ємність: для десульфурації потрібен шлак з високою основністю (високий вміст CaO) і високою сульфідною ємністю, що дозволяє йому зв'язувати сірку в CaS.
- Низький FeO та MnO для забезпечення відновлювальних умов, які є термодинамічно сприятливими для десульфурації. Шлак повинен бути "білим" або "темним" (із низьким вмістом оксидів заліза та марганцю).
- Низька в'язкість: Досягається додаванням плавицевого шпату CaF<sub>2</sub> та глинозему Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, що забезпечує швидкий масообмін.

Технологія використання рідкого шлаку: попереднє розплавлення шлаку дозволяє миттєво ввести його в реакцію з металом, уникаючи витрат часу на плавлення твердих сумішей і мінімізуючи тепловтрати. Такий підхід значно підвищує кінцеву ступінь очищення.

Модифікація включень: Активний шлак не лише видаляє сірку, а й модифікує оксидні включення (наприклад, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, перетворюючи їх на низькоплавкі, сферичні кальцієві алюмінати, які менш шкідливі для прокатки та розливання.

#### Розрахунок сульфідної ємності та ефективності десульфурації

Ефективність шлакового рафінування тісно пов'язана з термодинамікою. Одним з ключових показників є ступінь десульфурації ( $\eta_S$ ).

$$\eta_S = \frac{[\%S]_{\text{початк}} - [\%S]_{\text{кінц}}}{[\%S]_{\text{початк}}} \cdot 100\%$$

**Умова:** У ківш із 120 тоннами сталі залили 4.5 тонни попередньо розплавленого синтетичного шлаку. Початковий вміст сірки в металі  $[\%S]_{\text{початк}} = 0.025\%$ . Після 15 хвилин обробки вміст сірки знизився до  $[\%S]_{\text{кінц}} = 0.006\%$ .

**Завдання:**

1. Розрахуйте **ступінь десульфурації** ( $\eta_S$ ) у відсотках.
2. Обчисліть **коефіцієнт розподілу сірки** ( $L_S$ ) між шлаком та металом, використовуючи формулу:  $L_S = \frac{\Delta S}{S_{\text{шлак}}}$ , де  $\Delta S$  – загальна маса видаленої сірки,  $S_{\text{шлак}}$  – маса шлаку.
3. Визначте кінцевий вміст сірки в шлаку  $(\%S)_{\text{кінц}}$ , якщо вся видалена сірка перейшла у шлак.

**Контрольні питання:**

1. Які хімічні вимоги висуваються до синтетичного шлаку для ефективної десульфурації? Поясніть роль високої основності та низького вмісту FeO.
2. Що таке модифікація неметалевих включень у процесі шлакового рафінування? Наведіть приклад перетворення включення ( $Al_2O_3$ ) під дією шлаку.
3. Поясніть, як інтенсивне перемішування Аргоном впливає на кінетику рафінування. Чому використання рідкого шлаку є перевагою над твердими шлакоутворюючими сумішами?

### **Лабораторна робота №3**

#### **Обробка сталі нейтральними та активними газами**

##### **Мета роботи**

Вивчити різні стадії та ключові технологічні процеси обробки металів активними газами.

##### **Теоретичні відомості**

Ця тема розділяє функції газів на **інертні** (фізичні) та **активні** (хімічні), що використовуються для точного контролю складу.

##### *Обробка нейтральними газами (Аргон):*

Дегазація: застосовується для виведення розчиненого водню ( $H_2$ ), який викликає флокени (волосоподібні тріщини) у масивних виливках, та азоту

(N<sub>2</sub>). Бульбашки Ar діють як ділянки зародження (нуклеації) для виділення цих газів.

*Обробка активними газами (Кисень, O<sub>2</sub>):*

Селективне обезвуглецювання (AOD / VOD): це основний метод виробництва нержавіючих сталей. У цих процесах ключове завдання – видалити вуглець до  $C < 0.03$  при збереженні дорогого хрому (Cr) від окислення.

*Термодинаміка селективності:*

Реакція окислення вуглецю  $2[C] + O_2 = 2 CO$  стає більш термодинамічно вигідною, ніж окислення хрому  $4[Cr] + 3O_2 = 2Cr_2O_3$ , якщо знизити парціальний тиск CO у газовій фазі. В AOD це досягається розбавленням O<sub>2</sub> аргоном; у VOD – використанням вакууму.

*Хімічний підігрів:* кисень може використовуватися для окислення Al, Si або C, які додаються в метал, що є екзотермічною реакцією і забезпечує додатковий підігрів металу.

### Розрахунок витрати Аргону для дегазації водню

Для видалення водню необхідно забезпечити певний об'єм Аргону на тонну металу.

**Умова:** Необхідно знизити вміст водню у **80 тоннах** сталі з  $[\%H]_{\text{початок}} = 6$  ppm до  $[\%H]_{\text{кінець}} = 2$  ppm за допомогою продування Аргоном. Досвід показує, що для досягнення такої мети необхідно витратити близько **0.45 м<sup>3</sup> Аргону на тонну сталі** протягом усього процесу.

**Завдання:**

1. Обчисліть загальний необхідний об'єм Аргону (м<sup>3</sup>) для обробки.
2. Якщо процес продування триває **15 хвилин**, яка має бути середня витрата Аргону (м<sup>3</sup>/хв)?
3. Поясніть, що станеться з вмістом водню, якщо випадково використати **Азот** замість Аргону (хімічно нелегована сталь).

*Контрольні питання:*

1. Опишіть функціональну різницю між нейтральними (Ar) та активними (O<sub>2</sub>) газами у позапічній обробці. Який газ використовується для дегазації?
2. Поясніть механізм селективного обезвуглецювання в агрегатах типу AOD (Аргон-кисневе обезвуглецювання). Яка роль зниження парціального тиску CO у цьому процесі?
3. У чому полягає суть хімічного підігріву металу? Які елементи найчастіше окислюються для отримання додаткового тепла?

## Лабораторна робота №4

### Регулювання температури металу.

#### Мета роботи

Вивчити основні етапи регулювання температури металів.

#### Теоретичні відомості

Ця тема розкриває важливість теплового менеджменту як невід'ємної частини металургійної технології.

Значення Температурного вікна: для кожної марки сталі існує вузький діапазон (температурне вікно), в якому вона повинна бути розлита. Надто низька температура призводить до передчасного застигання (прихватів), надто висока - до низької якості поверхні та підвищеного зносу футерівки.

Агрегат Піч-ківш (LF): Це основний інструмент терморегулювання. LF - це по суті ківш, обладнаний системою дугового нагріву та аргоновим продуванням.

Переваги LF:

- Необмежений час обробки: компенсація тепловтрат дозволяє проводити тривале рафінування та глибоке легування.
- Точність температури: досягнення цільової температури розливання з високою точністю (до  $\pm 2^\circ\text{C}$ ).
- Підтримка відновлювальних умов: дуговий нагрів над шлаком дозволяє підтримувати шлак у рідкому стані та зберігати відновлювальні умови, необхідні для десульфурзації.

*Методи охолодження:*

Введення шихти: додавання сталевого брухту або феросплавів, які охолоджують метал при плавленні.

Тепловтрати: контрольоване витримування металу з урахуванням питомих тепловтрат ковша (як правило,  $2-5^\circ\text{C}/\text{хв}$ ).

### Розрахунок теплового балансу та охолодження

**Умова:** У ковші знаходиться **100 тонн** сталі при температурі  $T_1 = 1650^\circ\text{C}$ . Цільова температура розливання  $T_{\text{ціль}} = 1605^\circ\text{C}$ . Для зниження температури вирішено додати сталевий брухт, температура якого  $T_{\text{бр}} = 20^\circ\text{C}$ .

- Питома теплоємність рідкої сталі  $c_{\text{ст}} = 0.75 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .
- Питома теплота плавлення сталі  $L_{\text{пл}} = 270 \text{ кДж}/\text{кг}$ .
- Температура плавлення сталі  $T_{\text{пл}} = 1538^\circ\text{C}$ .

### Завдання:

1. Розрахуйте загальну кількість тепла ( $\Delta Q_{\text{ст}}$ ), яке необхідно забрати з розплаву, щоб досягти  $T_{\text{ціль}}$ .

$$\Delta Q_{\text{ст}} = M_{\text{ст}} \cdot c_{\text{ст}} \cdot (T_1 - T_{\text{ціль}})$$

2. Розрахуйте, скільки тепла поглинає **1 кг брухту** під час нагрівання та плавлення (до  $1605^\circ\text{C}$ ).

$$\Delta Q_{\text{бр}} = 1 \cdot c_{\text{ст}} \cdot (T_{\text{пл}} - T_{\text{бр}}) + 1 \cdot L_{\text{пл}} + 1 \cdot c_{\text{ст}} \cdot (T_{\text{ціль}} - T_{\text{пл}})$$

3. Визначте необхідну масу брухту ( $M_{\text{бр}}$ ), яку потрібно додати для досягнення цільової температури.

$$M_{\text{бр}} = \Delta Q_{\text{ст}} / \Delta Q_{\text{бр}}$$

### Контрольні питання:

1. Що таке температурне вікно розливання і чому його точне дотримання є критичним для якості кінцевого продукту?
2. Опишіть принцип дії та основні функції агрегату Піч-ківш (LF). Як LF допомагає підтримувати відновлювальні умови для рафінування?
3. Як розраховується тепловий баланс при охолодженні металу холодною шихтою? Які параметри шихти (окрім маси) необхідно врахувати?

## Лабораторна робота №5

### Способи вакуумної обробки сталі.

#### Мета роботи

Розглянути етапи вакуумування сталі в вакуумному ковші. Основні етапи вакуумування сталі в ковші з додатковим підігрівом..

#### Теоретичні відомості

Розглядає глибоке рафінування сталі за умов зниженого тиску, що є найбільш ефективним способом видалення газів та вуглецю.

Термодинаміка (Закон Сівертса): Згідно з формулою ,  $[X] = K \cdot \sqrt{P_X}$  вміст розчиненого газу [X] у металі прямо пропорційний квадратному кореню його

парціального тиску  $P_X$  у навколишній атмосфері. Зниження  $P_X$  за допомогою вакууму зміщує рівновагу, змушуючи гази виділятися з металу.

**Основні Процеси:**

Дегазація водню ( $H_2$ ): Найважливіший процес, оскільки вакуумування легко знижує  $H_2$  з 5-8 ppm до 1-2 ppm, усуваючи ризик флокенів.

Вакуумне обезвуглецювання: Реакція  $[C] + [O] \rightarrow CO$  газ під вакуумом дозволяє досягти ультра-низького вмісту вуглецю (ULC, <0.003% C) при мінімальній витраті кисню та легуючих.

*Типи вакуумних агрегатів:*

VD (Vacuum Degassing): Обробка сталі безпосередньо в ковші, розміщеному у вакуумній камері.

RH (Ruhstahl-Hehaeus): Циркуляційний вакууматор. Метал багаторазово (до 20 разів) проходить через вакуумну камеру. Це найефективніший спосіб дегазації великих обсягів сталі завдяки постійному оновленню поверхні металу, що взаємодіє з вакуумом.

### **Використання Закону Сівертса для оцінки дегазації**

Закон Сівертса описує рівновагу між вмістом газу в металі та його парціальним тиском.

$$[\%X] = K \cdot \sqrt{P_X}$$

**Умова:** При нормальному атмосферному тиску ( $P_1 = 760$  Торр) вміст водню у сталі становить  $[\%H]_1 = 5$  ppm. Проводиться вакуумна обробка в агрегаті VD до тиску  $P_2 = 1.5$  Торр.

**Завдання:**

1. Визначте константу рівноваги  $K$  для водню у цьому металі.
2. Розрахуйте **рівноважний** вміст водню  $[\%H]_2$ , якого теоретично можна досягти при вакуумуванні до 1.5 Торр.
3. Обчисліть ступінь теоретичного видалення водню ( $\eta_H$ ).
4. Поясніть, чому фактичний вміст водню після вакуумування (наприклад, 2.5 ppm) зазвичай вищий за рівноважний.

*Контрольні питання:*

1. Сформулюйте закон Сівертса та поясніть його застосування у вакуумній дегазації. Чому саме Водень є основною мішенню цього процесу?

2. Який дефект у сталі спричинений підвищеним вмістом Водню? Якої концентрації  $H_2$  зазвичай намагаються досягти після вакуумної обробки?
3. Поясніть принципову відмінність між вакуумним ковшем та циркуляційним вакууматором з точки зору ефективності та інтенсивності обробки.

Навчальне видання

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних та самостійних робіт з  
навчальної дисципліни  
«Сучасні методи позапічної обробки сплавів», для  
студентів спеціальності  
G10 Металургія

Укладачі: ПЕТРОВА Юлія Володимирівна

Відповідальний за випуск О. В. Акімов  
Роботу до видання рекомендує Т.В. Берлізева

За авторською редакцією

План 2025р., поз. 679

Підп. до Друку 2025 р. Гарнітура Times New Roman  
Видавничий центр НТУ «ХП»,  
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.  
Електронна версія