

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Український державний університет  
науки і технологій**

---

Кафедра «Металургії чавуну і сталі»

*В авторській редакції*

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА**

Навчально-методичні рекомендації  
до практичних занять

*Електронне видання*

ДНІПРО  
2025

УДК 669.18(076.5)

Е 41

Упорядники:

*О. М. Стоянов, Є. В. Синегін, В. О. Рубан, С. В. Журавльова*

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми  
G10.2.01 «Металургійні процеси одержання та обробки металів та сплавів»  
Протокол №3 від 08.09.2025 р.

Е 41 Експериментальні дослідження технологічних процесів сталеплавильного виробництва : навчально-методичні рекомендації до практичних занять / упоряд. О. М. Стоянов, Є. В. Синегін, В. О. Рубан, С. В. Журавльова ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 40 с.

В навчально-методичних рекомендаціях викладено методичні настанови до вивчення дисципліни «Експериментальні дослідження технологічних процесів сталеплавильного виробництва», наведено інформацію до вивчення дисципліни, робочу програму дисципліни, теми та їх зміст і методичні рекомендації для виконання практичних завдань.

Навчально-методичні рекомендації призначені для опанування освітньої компоненти «Експериментальні дослідження технологічних процесів сталеплавильного виробництва» за спеціальністю G10 «Металургія» для ОПП «Технології та обладнання виробництва металів і сплавів» освітнього рівня магістр.

© Стоянов О. М. та ін., упорядкування, 2025

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025

## ЗМІСТ

1. МЕТА І ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ .....	5
1.1 Мета вивчення дисципліни.....	5
1.2 Завдання вивчення дисципліни.....	5
2. РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ, ТЕМИ ТА ЇХ ЗМІСТ .....	6
2.1 Робоча програма дисципліни .....	6
2.2 Назви тем та їх зміст.....	6
ПРАКТИЧНА РОБОТА №1 «ДОСЛІДЖЕННЯ ДОННОЇ ПРОДУВКИ СТАЛІ В КОНВЕРТОРІ» .....	8
1.1 Вступ .....	8
1.2 Мета роботи.....	8
1.3 Зміст роботи .....	9
1.4 Устаткування, що використовується в роботі .....	9
1.5 Зміст звіту і представлення результатів виконаної роботи.....	9
ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 «МОДЕЛЮВАННЯ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ ПРИ ЗМІНІ ЯКОСТІ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ».....	10
2.1 Вступ .....	10
2.2 Мета і зміст роботи.....	11
2.3 Загальні положення .....	11
2.4 Порядок виконання роботи.....	15
ПРАКТИЧНА РОБОТА №3 «РОЗРАХУНОК ТЕПЛОТВОРНОЇ ЗДІБНОСТІ ГАЗІВ».....	17
3.1 Вступ.....	17
3.2 Мета роботи.....	17
3.3 Зміст роботи .....	17
3.4 Загальні положення .....	18
3.5 Порядок виконання роботи.....	19
ПРАКТИЧНА РОБОТА №4 «ДОСЛІДЖЕННЯ МАКРОСТРУКТУРИ СТАЛЬНИХ ЗЛИВКІВ» .....	21
4.1 Вступ .....	21
4.2 Мета і зміст роботи.....	23
4.3 Загальні положення .....	24

4.4 Устаткування, що використовується при виконанні роботи .....	26
4.5 Методика і порядок виконання роботи .....	27
4.6 Зміст звіту про роботу .....	29
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА №5 «РОЗРАХУНОК ПРОНИКНЕННЯ ГАЗО- ПОРОШКОВОГО СТРУМЕНЯ» .....</b>	<b>31</b>
5.1 Вступ .....	31
5.2 Мета і зміст роботи .....	32
5.3 Загальні положення .....	32
5.4 Порядок розрахунку .....	38
5.5 Вихідні данні для розрахунків.....	38

# 1. МЕТА І ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

## 1.1 Мета вивчення дисципліни

Засвоєння знань та придбання навичок в питаннях проведення досліджень, аналізу їх результатів та практичного використання в умовах сучасного сталеплавильного виробництва.

## 1.2 Завдання вивчення дисципліни

Внаслідок вивчення дисципліни студенти повинні вміти:

- планувати і виконувати експериментальні дослідження в металургії та інтерпретувати їх результати;
- оцінювати ризики при плануванні або впровадження нових технологічних процесів;
- здійснювати спеціалізовані наукові дослідження, проводити аналіз їх результатів та розробку рекомендації, щодо вдосконалення технологічного процесу в умовах сучасного сталеплавильного виробництва;
- застосовувати відомі методи, стандартні програми розрахунку параметрів та показників процесу виробництва чорних металів;
- прогнозувати поведінку об'єкту досліджень при зміні параметрів його стану, обґрунтовувати та визначати основні структурно-технологічні зв'язки в умовах сучасного металургійного виробництва;
- збирати необхідну інформацію, використовуючи науково-технічну літературу, бази даних та інші джерела, аналізувати і оцінювати її, обирати оптимальні методи та здійснювати статистичний аналіз даних;
- формувати структуру і властивості продукції металургійного виробництва відповідно до потреб замовників;
- застосовувати сучасні математичні методи, цифрові технології та спеціалізоване програмне забезпечення для розв'язання складних задач і проблем металургії;
- аналізувати і вирішувати інженерні проблеми в металургії;
- вміти на підставі аналізу оцінити техніко – економічні та інші наслідки використання цих результатів та розробити рекомендації, щодо

вдосконалення технологічного процесу, показати можливі шляхи втілення результатів дослідження;

- обирати оптимальну для конкретних умов методику дослідження, обладнання для проведення експерименту та провести його методами математичного та/або фізичного моделювання процесів.

## 2. РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ, ТЕМИ ТА ЇХ ЗМІСТ

### 2.1 Робоча програма дисципліни

Розподіл навчальних годин

Види навчальної діяльності	Усього	Семестри			
		1		2	
		1.1	1.2	2.1	2.2
Усього годин за навчальним планом	90	90			
у тому числі:					
Аудиторні заняття	32	32			
– лекції	8	8			
– лабораторні роботи	0	0			
– практичні заняття	24	24			
– семінарські заняття	0	0			
Самостійна робота	58	58			
– підготовка до аудиторних занять	16	16			
– виконання та захист курсової роботи	0	0			
– виконання та захист індивідуальних завдань	0	0			
– підготовка та складання екзаменів	0	0			
– підготовка до інших контрольних заходів	18	18			
– опрацювання розділів, які не викладаються на лекціях	16	16			
Форма семестрового контролю		Дифзалік			

### 2.2 Назви тем та їх зміст

У межах дисципліни розглядаються такі теми практичних робіт, спрямовані на засвоєння знань і набуття навичок проведення досліджень, аналізу їх результатів та практичного застосування в умовах сучасного сталеплавильного виробництва:

– **Практична робота №1. «Дослідження донної продувки сталі в конверторі».** Вивчаються особливості подачі дуття через днище конвертера, його вплив на перемішування металу та шлаку, інтенсифікацію тепло- і масообміну. Оскільки безпосередні спостереження у реальних конвертерах неможливі, дослідження проводяться на прозорих моделях, що дозволяє аналізувати аерогідродинаміку ванни.

– **Практична робота №2. «Моделювання конвертерної плавки при зміні якості шихтових матеріалів».** Робота спрямована на дослідження впливу складу й властивостей шихтових матеріалів на перебіг плавки, вихід придатного металу, формування складу шлаку та витрати основних ресурсів. Використовуються програмні засоби моделювання для оптимізації технології.

– **Практична робота №3. «Розрахунок теплотворної здатності газів».** Студенти навчаються визначати нижчу теплоту згоряння окремих газів та газових сумішей, виконувати розрахунки для визначення оптимальних пропорцій компонентів та оцінювати ефективність використання газоподібного палива у металургійних процесах.

– **Практична робота №4. «Моделювання процесу формування зон макроструктури сталевого злитка».** Досліджуються закономірності утворення різних зон макроструктури (зони стовпчастих і рівномірних кристалів, усадкової раковини) у процесі кристалізації сталі. Використовуються моделі з прозорими матеріалами для візуалізації перебігу процесу.

– **Практична робота №5. «Розрахунок проникнення газопорошкового струменя».** Вивчається механізм подачі газо-порошкових сумішей у ванну рідкого металу, розраховуються імпульс струменя, його густина, критична швидкість витікання та глибина проникнення. Аналізуються умови впровадження порошкоподібних часток у метал.

# **ПРАКТИЧНА РОБОТА №1**

## **«ДОСЛІДЖЕННЯ ДОННОЇ ПРОДУВКИ СТАЛІ В КОНВЕРТОРІ»**

### **1.1 Вступ**

Подача дуття в конвертер знизу через дно має ряд, достоїнств, що полягають, головним чином, в можливості розосередження дуття і інтенсивному перемішуванні дуття з металом, що прискорює всі масо- і теплообмінні процеси у ванні.

Спостереження і дослідження руху газового струменя, рідкого металу і шлаку безпосередньо в конвертерах майже неможливі із-за непрозорості конвертера, металу і шлаку. Вивчення аерогідродинаміки конвертерної ванни проводиться переважно на моделях з прозорими стінками.

В даний час на кафедрі розроблена методика "гарячого" моделювання донного і верхнього продування металу в тиглях з прозорою кварцовою стінкою. Проте ця методика труднодоступна для виконання учбових лабораторних робіт. Крім того вона дозволяє вивчати аерогідродинаміку ванни лише поблизу зони впровадження струменя дуття в метал і не дає можливості представити в цілому гідродинамічну обстановку в конвертерній ванні. Тому в справжній роботі моделювання здійснюється в прозорій моделі, виконаній з оргстекла з використанням води як рідини, що моделює рідкий метал.

Здійснення повної гідродинамічної подібності продування конвертерної ванни знизу практично неможливе, але якісно подібну картину взаємодії дуття з рідиною, циркуляції рідкої ванни даний метод дозволяє отримати.

### **1.2 Мета роботи**

Метою роботи є практичне ознайомлення з характером взаємодії донного дуття з рідиною, циркуляції рідкої ванни і тим самим закріплення знань теоретичних положень лекційного курсу.

### **1.3 Зміст роботи**

У програмі виконання роботи шляхом візуальних спостережень вивчаються:

- режими витікання газу в рідину при донному підведенні дуття залежно від тиску останнього.
- вплив розташування сопел в днищі, і їх розмір, при незмінній сумарній площі живого перетину сопел, на характер циркуляції, інтенсивність перемішування і ступінь диспергування фаз (при вертикальному і похилому положенні конвертера).
- вплив тиску дуття на вказані параметри гідродинаміки конвертерної ванни.

### **1.4 Устаткування, що використовується в роботі**

1. Модель 20-тонного бесімерівського конвертера (лінійний масштаб 1/20).
2. Компресор для подачі повітря в конвертер через днище.
3. Манометр для виміру тиску повітря в повітряній коробці.
4. Змінні днища з різним розташуванням сопел при постійній сумарній площі їх живого перетину:
  - з рівномірним розташуванням сопел малого розміру ( $d_c=1,0$  мм);
  - з концентрованим у центрі днища розташуванням сопел відносно великого розміру ( $d_c = 3,0$  мм).

### **1.5 Зміст звіту і представлення результатів виконаної роботи**

Звіт повинен містити найменування теми, мету роботи, схему експериментальної установки, результати роботи, висновки.

Результатом виконаної роботи є ескізи (зарисовки) спостережуваних картин характеру витікання повітря (при різному тиску дуття), циркуляції рідини при продуванні через днища з різним розташуванням сопел і тиску дуття у вертикальному та похилому положенні конвертера.

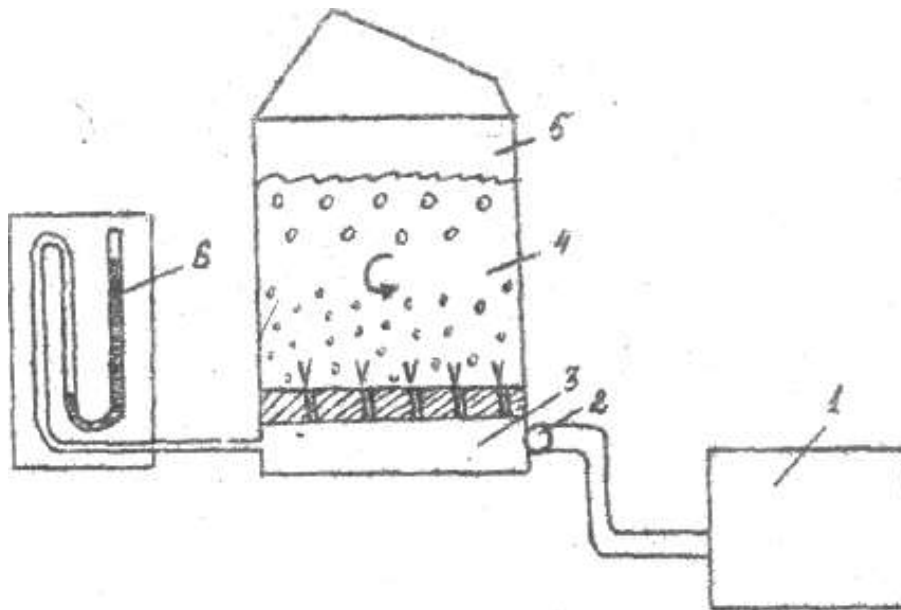


Рис. 1. Схема експериментальної установки.

1 - компресор, 2 - кільцевий повітропровід, 3 - повітряна коробка,  
4 - вода, 5 - модель конвертера, 6 - манометр

### 1.6 Правила безпеки при виконанні робіт

Включення і виключення компресора в електромережу здійснюється учбовим майстром.

Вода заливається в конвертер в похилому його положенні при включеному дутті.

Необхідно бути обережним при виконанні робіт по заміні типу днища.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 «МОДЕЛЮВАННЯ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ ПРИ ЗМІНІ ЯКОСТІ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ»

### 2.1 Вступ

Киснево-конвертерний процес є основним методом виробництва сталі, який забезпечує високу продуктивність та якість металу при відносно низьких витратах енергії. Ефективність плавки значною мірою визначається якістю та співвідношенням шихтових матеріалів – рідкого чавуну, лому,

вапна, а також витратами кисню. Зміна їхнього складу та властивостей безпосередньо впливає на тепловий баланс, хімічні реакції у ванні, утворення шлаку, витрату шихти та кінцеві характеристики сталі.

Моделювання процесу конвертерної плавки дозволяє дослідити вплив різних факторів – вмісту вуглецю, кремнію, марганцю, сірки в чавуні, його температури, частки лому та властивостей вапна – на хід плавки та техніко-економічні показники процесу. Використання програмних засобів створює умови для оптимізації складу шихти, зниження витрат матеріалів та досягнення стабільної якості готової сталі.

## **2.2 Мета і зміст роботи**

Метою практичної роботи є набуття навичок розрахунку та моделювання параметрів киснево-конвертерної плавки при зміні якості шихтових матеріалів.

У процесі виконання роботи студент повинен визначати витрати чавуну, лому, вапна та кисню залежно від складу і температури вихідного металу, здійснювати аналіз теплового та хімічного балансу плавки, а також оцінювати вплив варіацій складу шихти на вихід придатного металу, характеристики шлаку та економічні показники процесу.

## **2.3 Загальні положення**

### ***Шихтовка плавки***

Конвертерна плавка шихтується з розрахунку закінчення продувки на заданій температурі й вмісті вуглецю в рідкій сталі та одержання необхідної основності шлаків.

Кількість рідкого чавуну та металевого лома на плавку задають, виходячи з теплових можливостей процесу, які визначаються фізичним і хімічним теплом чавуну.

Чавун до конвертерів надходить у заливних ковшах з міксерного відділення або ковшів міксерного типу з відомими параметрами - хімічний склад, температура, маса, що фіксуються в паспорті конвертерної плавки.

Для класичного варіанта киснево-конвертерної плавки без використання додаткових джерел тепла, частка лома в шихті великовантажних конвертерів становить 25 - 27 %. Для конвертерів малої

ємності - до 50 т., що мають високі теплові втрати, частка лома може зменшуватися до 13 - 15 %.

Орієнтовна витрата металевого лома на плавку можна визначити з виразу:

$$m_{л} = \frac{Q_{\text{хим.чуг}} + 88 \cdot t_{\text{чуг}} - 105,6 \cdot t_{\text{ст}} - 11440 \cdot C_{\text{ст}} + 17600}{10^{-2} \cdot Q_{\text{хим.чуг}} + 0,88 \cdot t_{\text{чуг}}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{хим.чуг.}} = (10182 + 23550 \cdot \alpha) \cdot C_{\text{чав}} + 26942 \cdot Si_{\text{чав}} + 7040 \cdot Mn_{\text{чав}} + 19777 \cdot P_{\text{чав}} \quad (2)$$

$$M_{л} = \frac{M_{\text{чуг}} \cdot m_{л}}{100 - m_{л}} \quad (3)$$

де  $Q_{\text{хим.чуг}}$  – хімічне тепло чавуну,  $m_{л}$  – частка лома в шихті конвертерної плавки, %;  $C_{\text{чуг}}$ ,  $Si_{\text{чуг}}$ ,  $Mn_{\text{чуг}}$ ,  $P_{\text{чуг}}$  – вміст у чавуні вуглецю, кремнію, марганцю й фосфору, відповідно, %;  $M_{\text{чуг}}$  – витрата чавуну на плавку, т.;  $M_{л}$  – витрата лома на плавку, т.;  $t_{\text{чуг}}$  – температура чавуну, °С;  $t_{\text{ст}}$  – задана температура сталі, °С;  $C_{\text{ст}}$  – середній вміст вуглецю у готовій сталі, %.

Витрата вапна на плавку визначається вмістом кремнію в чавуні та вимогою одержання необхідної основності шлаку наприкінці продувки. На практиці питома витрата вапна становить 60-100 кг/т сталі. У таблиці 1 наведена приблизна витрата вапна для великовантажних конвертерів (ємністю 350 т) залежно від вмісту кремнію в чавуні.

Таблиця 1

Витрата вапна на плавку для 350 т. конвертера

	Вміст кремнію в чавуні, %					
	<0.7	0.71–0.8	0.81–0.9	0.91–1.0	1.01–1.11	>1.11
витрата вапна, т.	19-24	22-27	25-30	27-33	32-36	35-42

### **Основність шлаку**

Після продувки стали із заданим вмістом сірки < 0,02 % основність шлаку повинна становити 3,3-3,5; з вмістом сірки 0,02-0,04 % 3,1-3,3; і вмістом сірки > 0,04 % 2,8-3,0.

Орієнтовну витрату вапна можна також визначити з виразу:

$$M_{\text{вап}} = \frac{0,01 \cdot B \cdot (2,14 \cdot M_{\text{чав}} \cdot Si_{\text{чав}} + 0,45 \cdot (M_{\text{чав}} + M_{\text{л}}))}{F_{\text{вап}}} \quad (4)$$

$$F_{\text{вап}} = 0,9 \cdot \left( \frac{CaO_{\text{вап}}}{100} - \frac{SiO_{2\text{вап}}}{100} \cdot B \right) \quad (5)$$

де  $F_{\text{вап}}$  – флюсуючі здатність вапна,  $CaO_{\text{вап}}$ ,  $SiO_{2\text{вап}}$  – вміст у вапні оксиду кальцію та кремнію, відповідно, %.

Витрати кисню на плавку визначаються хімічним складом шихти, готової сталі й особливостями технологічного режиму продувки. На практиці питома витрата кисню становить 50 – 65 м<sup>3</sup>/т сталі.

Орієнтовна витрата кисню може бути визначена з виразу, м<sup>3</sup>:

$$Q_{O_2} = 0,9 \cdot (M_{\text{чав}} + M_{\text{л}}) \cdot (50 \div 65) \quad (6)$$

### **Структура програми по моделюванню конвертерної плавки**

Програма моделювання й керування конвертерної плавки KONV реалізована в середовищі Excel. Користувальницький інтерфейс представлений у вигляді падаючого багаторівневого меню, розташованого у верхній частині екрана монітора.

Меню містить наступні розділи:

#### **Введення вихідних даних**

Даний розділ призначений для введення:

- хімічного складу й температури чавуну й сталі (таблиця 2);
- хімічного складу неметалічних матеріалів (таблиця 3);
- коефіцієнтів, що характеризують поточний стан технологічного процесу виплавки сталі (таблиця 4).

### **Розкислення**

Сталі всіх марок розкислюють у сталеразливному ковші. Не допускається застосування розкислювачів, хімічний склад яких не відомий. Розкислювачі присаджуються по масі з розрахунку одержання середнезаданого вмісту елементів у готовій сталі. Кількість феросплавів, що присаджуються у ківш можна розрахувати по формулі:

$$M_{ф.с.} = \frac{([X]_{г.ст} - [X]_{нов}) \cdot M_{ст}}{X_{ф.с.} \cdot (100 - y_x)} \cdot 100\% \quad (7)$$

де  $M_{ф.с.}$  – витрата феросплавів, т;  $[X]_{г.ст}$ ,  $[X]_{нов}$ ,  $[X]_{ф.с.}$  – вміст елементу в готовій сталі, на повалці та у феросплаві відповідно, %;  $M_{ст}$  – маса рідкої сталі, т;  $y_x$  – угар елементу розкислювача; %.

Угар елементів при розкисленні приймається рівним:

	Mn	Si
Кипляча	15 – 20	20 – 25
низьковуглецеві киплячі	15 – 20	30 – 35
спокійні	10 – 15	20 – 25

Для науглецювання металу при випуску плавки використовується мелений термоантрацит. Вміст вологи в термоантрациті не повинен перевищувати 5%. Витрата термоантрациту можна визначити з умови:

- витрати шихтових матеріалів;
- хімічного складу розкислювачів та науглецювачів.

### **Розрахунок**

При виконанні даної команди виконується розрахунок результатів конвертерної плавки згідно уведеним вихідним даним.

### **Результати**

Користувальницький інтерфейс пропонує обрати варіант виводу результатів розрахунку: на екран, на принтер або у файл.

### **Корегування**

Даний розділ містить порівняння поточних параметрів конвертерної плавки, отриманих у результаті розрахунку із заданими на плавку й пропонує проведення технологічних операцій

- доводки, тобто корегування вмісту у сталі вуглецю, сірки й температури металу, за рахунок завдання додаткової витрати кисню, вапна або вапняку;
- розкислення, тобто вибору розкислювача й завдання його витрати.

## **2.4 Порядок виконання роботи**

### *Перший етап.*

На підставі індивідуального завдання на проведення конвертерних плавок (таблиці 1, 5), і використовуючи знання, отримані при вивченні курсу «Виробництво сталі в кисневих конвертерах» і положення, викладених у розділі 1 даного посібника, студент визначає витрату шихтових матеріалів на плавку (лом, вапно, кисень), обирає коефіцієнти, що характеризують поточний стан технологічного процесу.

Зазначені вихідні дані вводяться в програму KONV, і виконується розрахунок конвертерної плавки. На підставі отриманих відомостей про хімічний склад й температуру металу на повалці приймається рішення про проведення корегуючих операцій або про випуск сталі у ківш із проведенням розкислення й науглецювання (при необхідності). У завдання студента входить одержання сталі з параметрами згідно обраного варіанту. Кількість корегуючих операцій не обмежується. Не дозволяється робити перешихтовку плавки в ході її проведення. Результати ведення плавки, включаючи вихідні дані, фіксуються в паспорті плавки.

Після влучення в задані хімічний склад та температуру сталі й проведення операцій розкислення й науглецювання плавка вважається закінченою.

### *Другий етап*

На підставі відомостей про зміну поточних параметрів конвертерної плавки, а також індивідуального завдання, використовуючи дані про вплив різних факторів на показники конвертерної плавки, з урахуванням результатів, отриманих на 1-ій повалці попередньої плавки, студент визначає витрату шихтових матеріалів на проведення наступної плавки. Надалі студент проводить плавку в послідовності, викладеної на першому етапі порядку виконання дійсної роботи.

У завдання студента входить проведення десяти плавок із влученням результату плавки в задані параметри.

### ***Третій етап***

На підставі заповнених паспортів конвертерних плавок студент визначає питому витрату шихтових матеріалів, т;

$$m_i = \frac{M_i}{M_{cm}} \quad (8)$$

де  $M_i$  – сумарна витрата матеріалу на плавку, т.

Отримані результати порівнюються з техніко-економічними показниками сучасної конвертерної плавки.

На підставі отриманих даних робиться висновок про характер проведеної серії плавок, аналізуються допущені помилки й пропонуються заходи щодо їхнього усунення.

### ***Четвертий етап***

(Доцільність його виконання студентом визначає викладач, виходячи з рамок варіанту завдання).

Використовуючи виконаний розрахунок конвертерної плавки згідно індивідуального завдання як базовий, студент моделює вплив по черзі концентрації в чавуні Si, Mn, S, C и його температури на масу скрапу, вихід придатного металу, шлаків, конвертерних газів (і знос футеровки).

Для розрахунків вибирають 3-5 інтервалів зміни параметрів усередині таких меж:

$$\text{Si} = 0,4 - 1,2 \% ; \text{Mn} = 0 - 1,0 \% ; \quad (9)$$

$$\text{S} = 0,02 - 0,06 \% ; \text{C} = 3,6 - 4,5 \% ; \quad (10)$$

$$t_{\text{чав}} = 1250 - 1450^{\circ}\text{C}. \quad (11)$$

У такий же спосіб можна моделювати конвертерний процес при зміні змісту CaO у вапні, забрудненні шлаку, складу футеровки й ін. параметрів процесу, що мають місце на практиці.

За результатами моделювання будують графіки, де на осі абсцис - змінювана величина, на осі ординат – досліджуваний параметр плавок. Суть графіків автором коментується.

## **ПРАКТИЧНА РОБОТА №3**

### **«РОЗРАХУНОК ТЕПЛОТВОРНОЇ ЗДІБНОСТІ ГАЗІВ»**

#### **3.1 Вступ**

Газоподібне паливо є важливим енергетичним ресурсом у металургії, хімічній та енергетичній промисловості. Його теплота згоряння залежить від хімічного складу, зокрема вмісту оксиду вуглецю, водню, та інших вуглеводнів. Для забезпечення стабільної роботи теплотехнічних агрегатів часто використовуються газові суміші, склад яких підбирається з урахуванням необхідної теплотворної здатності. Тому актуальним завданням є вміння розраховувати теплотворну здатність окремих газів та їхніх сумішей, що дозволяє ефективно регулювати теплові режими роботи печей і знижувати витрати палива.

#### **3.2 Мета роботи**

Метою роботи є засвоєння методики розрахунку теплотворної здатності окремих газів і газових сумішей та визначення оптимальних часток компонентів для досягнення заданих енергетичних характеристик палива.

#### **3.3 Зміст роботи**

У процесі виконання практичної роботи необхідно:

- ознайомитися з теоретичними положеннями щодо поняття теплоти згоряння газів, методами визначення нижчої теплоти згоряння для окремих компонентів палива та принципами складання теплових балансів.
- розрахувати теплотворну здатність окремих газів за їх хімічним складом, яка враховує внесок кожного компоненту до сумарної теплоти згоряння.
- Виконати обчислення для газових сумішей: визначити теплотворну здатність двох газів на основі даних таблиць; застосувати

рівняння для обчислення часток газів у суміші, що забезпечують задану теплотворну здатність палива; проаналізувати умови, за яких досягається рівновага між економічністю та теплотворними характеристиками.

- Проаналізувати вплив складу газів на теплотворну здатність суміші, звернувши увагу на роль основних компонентів (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> та інших) і їх пропорцій.
- Зробити висновки.

### 3.4 Загальні положення

Суміш яка складається з газу 1 та газу 2 спалюється у мартенівській печі. Розрахувати частку кожного газу у суміші.

Теплота згоряння 1 нм<sup>3</sup> газоподібного палива може бути розрахована по формулі:

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 126,4 \cdot \text{CO} + 108,2 \cdot \text{H}_2 + 358,5 \cdot \text{CH}_4 + 234,5 \cdot \text{H}_2\text{S} + 592 \cdot \text{C}_2\text{H}_4 + 638,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 913 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1404 \cdot \text{C}_6\text{H}_6, \text{ кДж/нм}^3. \quad (1)$$

де 126.4, 108.2, 358.5 й т.д. – теплота згоряння відповідно CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> й т.д., CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> і т.д. – об'ємний процентний вміст газів у паливі.

Сумарна теплотворна здатність суміші газів складає:

$$q = q_1 \cdot v_1 + q_2 \cdot v_2, \text{ кДж/м}^3 \quad (2)$$

де  $q_1, q_2$  – теплотворна здатність 1 та 2 газу,  $q_1, q_2$  – частка газу 1 та 2, частка од.

Після ряду перетворень рівняння (2) приймає вигляд:

$$v_1 = \frac{q - q_2}{q_1 - q_2}, \quad (3)$$

Оскільки  $v_1 + v_2 = 1$  то частка другого газу буде складати

$$v_2 = 1 - v_1 \quad (4)$$

### 3.5 Порядок виконання роботи

1. Розрахувати теплотворну здатність кожного з компонентів газоподібного палива.
2. Знайти частку кожного з газів що необхідно додати для отримання заданої теплотворної здатності палива.

Таблиця 1

Вихідні данні для розрахунків

№	Газ 1	Газ 2	Теплотворна здатність суміші, кДж/м <sup>3</sup>
1	Донецький антрацит	Калуш	7500
2	Богословське вугілля	Дашава	8000
3	Газове донецьке вугілля	Косов	8500
4	Северодонецьке вугілля	Опари	9000
5	Черемховське вугілля	Мелітопільське	9500
6	Челябінське вугілля	Ельшанське	10000
7	Підмосковне вугілля	Ставропіль північне поле	10500
8	Коксовий дріб'язок	Ставропіль південне поле	11000
9	Торф машинноформовочний	Мельнікове західне поле	11500
10	Гідроторф	Мельнікове східне поле	12000
11	Деревина (тріска)	Калуш	12500
12	Донецький антрацит	Опари	13000
13	Газове донецьке вугілля	Ельшанське	13500
14	Черемховське вугілля	Ставропіль південне поле	14000
15	Підмосковне вугілля	Мельнікове східне поле	14500
16	Торф машинноформовочний	Дашава	15000
17	Богословське вугілля	Косов	15500
18	Северодонецьке вугілля	Мелітопільське	16000
19	Челябінське вугілля	Ставропіль північне поле	16500
20	Коксовий дріб'язок	Мельнікове західне поле	17000
21	Гідроторф	Опари	17500
22	Деревина (тріска)	Мелітопільське	18000
23	Донецький антрацит	Ельшанське	18500
24	Богословське вугілля	Ставропіль північне поле	19000
25	Газове донецьке вугілля	Ставропіль південне поле	19500

Таблиця 2

## Хімічний склад газу 1

Генераторний газ	Хімічний склад газу, %					
	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Донецький антрациту	5,5	27,5	13,5	0,7	52,6	0,2
Богословське вугілля	8,0	24,0	13,6	2,7	51,7	—
Газове донецьке вугілля	5,0	26,5	13,5	2,8	51,9	0,3
Северодонецьке вугілля	7,0	25,0	15,0	3,0	49	1,0
Черемховське вугілля	7,0	25,5	15,5	3,2	48,7	0,1
Челябінське вугілля	5,0	30,0	13,0	2,2	49,4	0,2
Підмосковне вугілля	6,5	25,0	14,0	1,2	50,6	1,2
Коксовий дріб'язок	5,0	28,5	13,0	—	52,4	0,2
Торф машинноформовочний	8,0	28,0	15,0	3,6	45,3	0,1
Гідроторф	8,5	27,5	15,0	3,1	15,8	0,1
Деревина (тріска)	6,5	29,0	14,0	3,6	46,9	—

Таблиця 3

## Хімічний склад газу 2

Природний газ	Хімічний склад газу, %				
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Калуш	95,7	—	—	0,1	4,2
Дашава	97,8	0,5	0,35	0,05	1,3
Косов	75,7	21,3	3,0	—	—
Опари	89,0	9,1	—	—	—
Мелітопільське	98,0	—	—	0,2	1,8
Ельшанське	93,2	0,7	1,7	—	4,4
Ставропіль північне поле	97,7	—	—	0,7	1,6
Ставропіль південне поле	60,0	—	—	—	40,0
Мельнікове західне поле	55,0	—	—	0,2	44,8
Мельнікове східне поле	88,0	0,2	—	0,1	11,7

## ПРАКТИЧНА РОБОТА №4

### «ДОСЛІДЖЕННЯ МАКРОСТРУКТУРИ СТАЛЬНИХ ЗЛИВКІВ»

#### 4.1 Вступ

Перетворення рідкої металевої фази на тверду відбувається шляхом кристалізації, яка пов'язана з відведенням тепла від рідини. При охолодженні металу, розлитого у виливницю, кристалізатор або іншу форму, настає момент, коли температура рідкого металу знижується до температури його плавлення (кристалізації) і створюються умови для кристалізації металу. На процес формування злитка роблять вплив склад і температура металу, умови теплообміну між злитком і навколишнім середовищем (виливницею, кристалізатором і т.д.), спосіб розливання і ін.

Сталь так само як і всі метали, при твердінні утворює кристали, тобто тверді тіла, що мають впорядковане розташування атомів. Утворення зародка кристала пов'язане із збільшенням вільної енергії, що викликається витратою енергії на створення нової поверхні розділу між зародком кристала і рідиною. Чим менше величина енергії, яку необхідно витратити для утворення зародка (тобто робота утворення зародка), тим вірогідніше його поява. Умови зародження кристалів істотно полегшуються за наявності готової поверхні розділу фаз. Цим пояснюється переважне зародження частинок твердої фази на сторонніх частинках (твердих частинках тугоплавких неметалічних включень і т.д.) або на поверхні твердих тіл (поверхня виливниці, кристалізатора і т.д.)

Звичайна структура злитка спокійної сталі характеризується наступними зонами (рис.1).

*Зона дрібних безладно орієнтованих равноосних кристалів («скориночка» злитка)* утворюється у момент зіткнення рідкої сталі із стінкою виливниці (кристалізатора і т.д.). В результаті сильного переохолодження в цей період утворюється велика кількість центрів кристалізації, розташованих близько один до одного. Кристали ростуть в обмежених умовах і у зв'язку з короткочасністю кристалізації даної зони мають малі розміри, осі їх не мають певної орієнтації в просторі.

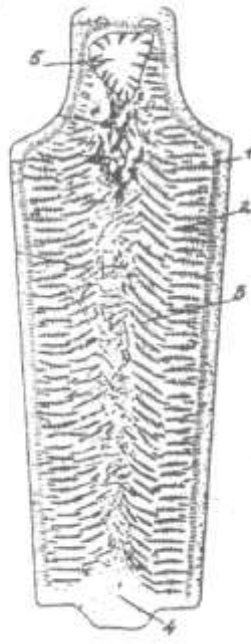


Рис. 1. Будова злитка спокійної сталі: 1 - зона дрібних безладно орієнтованих равноосних кристалів ("скоринка" злитка); 2 - зона столбчатих кристалів; 3 - зона крупних неорієнтованих кристалів; 4 - зона конуса осадження кристалів; 5 - зона усадкової раковини.

**Зона стовбчастих кристалів.** Утворення кіркового шару зменшує тепловідвід від рідкого металу до виливниці. У цей момент нових центрів кристалізації виникає мало, в основному ростуть кристали, що утворилися раніше, а лінійна швидкість росту кристалів залишається ще чималою. Основним напрямом розвитку кристалів є межа рідкого розплаву, тобто сторона, зворотна тепловому потоку, що відводиться. Протяжність і характер цієї зони визначається складом сталі, інтенсивністю охолодження, різницею температур рідкого розплаву (маткового розчину) і зовнішньою охолоджуючою поверхнею. В кінці кристалізація даної зони починає виявлятися усадка злитка, що супроводжується утворенням по всьому периметру злитка теплоізолюючого повітряного зазору між застигаючим злитком і виливницею (кристалізатором і т.д.). Направлений (від центру злитка до стінки виливниці) тепловідвід в зоні рідкого металу, що залишився, практично припиняється.

### ***Зона великих безладно орієнтованих равноосних кристалів.***

Формування зони відбувається при значному зниженні тепловідвода і менш чіткій його спрямованості. У цих умовах зростання кристалів відбувається на поверхні вже наявних столбчастих кристалів і на окремих сторонніх включеннях (неметалічні включення), зважених в рідкій сталі. Невелика кількість включень в рідкій сталі, які можуть бути центрами кристалізації, і значна відстань між ними сприяє зростанню кристалів до великих розмірів. Головні осі цих кристалів не мають певної орієнтації в просторі у зв'язку з відсутністю чітко вираженого направлено теплового відводу і різної орієнтації кристалічних решіток сторонніх включень, на яких ростуть кристали.

***Зона конуса осадження кристалів*** має конусоподібну форму без чітко позначеної вершини і розташована в нижній частині злитка. Ця зона є конгломератом зрощених кристалів, частина яких росла вгору під впливом охолоджуючої дії дна виливниці (піддону), частина опускалася вниз в результаті обломлення кристалів другої зони, а також опускання кристалів при кристалізації осьової частини злитка.

***Зона усадкової раковини*** являє собою порожнечі і рихлості в злитку, утворені унаслідок зменшення об'єму сталі під час переходу її з рідкого в твердий стан в процесі кристалізації. В основному усадкова раковина розташовується у верхній (додатковій) частині злитка. Ступінь ураженості злитка усадковою раковиною визначається не її об'ємом, який змінюється трохи, а її формою, на формування якої робить вплив цілий ряд технологічних параметрів розливання (форма виливниці, ефективність утеплення верхньої частини злитка і ін.).

## **4.2 Мета і зміст роботи**

Метою справжньої роботи є вивчення процесу формування кристалічних зон і усадкової раковини в злитках спокійної сталі.

В процесі виконання роботи шляхом моделювання на прозорих моделях відтворюється подібність процесу формування кристалічних зон і усадкової раковини в злитках спокійної сталі. Як речовина, що моделює спокійну сталь, що твердіє у виливниці, узятий гіпосульфід.

## Фізичні властивості матеріалів та лінійний масштаб моделювання

Об'єкт	Матеріал	Щільність твердого матеріалу, кг/м <sup>3</sup>	Температура плавління, °С	Коефіцієнт затвердіння, К, м/с <sup>0,5</sup>	Лінійний масштаб моделювання виливниці, М1
Натура (Н)	сталь (C<0,5 %)	7800	1460	$3 \cdot 10^{-3}$	8
Модель (М)	гіпосульфит (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,119	47,9		1

## 4.3 Загальні положення

Вирішальний вплив на формування кристалічної структури в злитку надають наступні параметри:

а) величина інтервалу кристалізації або різниця температур ліквідуса і солідуса ( $\Delta T_1$ );

б) градієнт температур в об'ємах сталі, що твердіють, ( $\Delta T_2$ ), який характеризує інтенсивність охолодження злитка.

Залежно від величини співвідношення  $\Delta T_1 / \Delta T_2$  розрізняється три основні умови формування зон злитка:

1) при  $\Delta T_1 / \Delta T_2 \ll 1$  затвердіння відбувається послідовно з великою швидкістю;

2) при  $\Delta T_1 / \Delta T_2 = 1$  проходить послідовно (об'ємна кристалізація);

3) при  $\Delta T_1 / \Delta T_2 \gg 1$  відбувається об'ємна кристалізація, що супроводжується зародженням та ростом кристалів по об'єму, що затвердів.

Товщина затверділого шару металу визначається кількістю відведеної теплоти кристалізації. Для затвердіння шару товщиною  $d\xi$  за час  $d\tau$  на одиницю поверхні злитка необхідно відвести тепла (без урахування тепла перегріву рідкого металу)

$$dq_1 = \rho_{Te} \cdot [r_K + 0,5 \cdot C \cdot (T_K - T_{II})] \cdot d\xi, \quad (1)$$

де  $\rho_{TB}$  — щільність твердого металу;  $C$  — теплоємність твердого металу;  
 $T_K, T_{II}$  — відповідно, температура кристалізації та поверхні злитка.

За час  $d\tau$  крізь затверділу скоринку товщиною  $\xi$  відводиться тепла

$$dq_2 = \lambda / \xi \cdot (T_K - T_n) \cdot d\tau, \quad (2)$$

де  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності металу.

Враховуючи, що тепло відведене крізь скоринку, дорівнює теплу, що виділилося при затвердінні елементарного шару ( $dq_1 = dq_2$ ), та прийнявши  $(T_K - T_n) = \text{const}$  та вирішуючи відносно  $\xi$ , отримаємо значення товщини затверділого шару металу

$$\xi = \sqrt{\frac{2\lambda \cdot (T_K - T_n)}{\rho_{TB} \cdot [r_K + 0,5C \cdot (T_K - T_{II})]} \cdot \tau} \quad (3)$$

та, прийнявши

$$K = \sqrt{\frac{2\lambda \cdot (T_K - T_n)}{\rho_{TB} \cdot [r_K + 0,5C \cdot (T_K - T_{II})]}}, \quad (4)$$

Отримаємо

$$\xi = K \cdot \sqrt{\tau}, \quad (5)$$

де  $K$  — коефіцієнт затвердіння, що залежить від перепаду температур у скоринці злитка.

Залежність (5) товщини затверділої скоринки від часу кристалізації відома як «закон квадратного кореня».

У разі моделювання процесу, що розглядається, використовуючи (5) для умов кристалізації реального сталюого злитка (натури) та моделюючого матеріалу (моделі), можна записати

$$\frac{D_H}{2} = K_H \cdot \sqrt{\tau_H}, \quad \frac{D_M}{2} = K_M \cdot \sqrt{\tau_M}, \quad (6)$$

де  $D_H, D_M$  — приведені середні діаметри виливниць натури та моделі;  
 $K_H, K_M$  — коефіцієнти затвердіння сталі (натури) та матеріалу, що моделює;  
 $\tau_H, \tau_M$  — час затвердіння сталюого злитка та моделі.

Для переносу результатів моделювання на реальні процеси використовують масштаб моделювання

$$\frac{D_H}{D_M} = \frac{K_H \cdot \sqrt{\tau_H}}{K_M \cdot \sqrt{\tau_M}}, \quad (7)$$

де  $D_H / D_M = M_l$  — лінійний масштаб моделювання;  
 $K_H / K_M = M_K$  — масштаб коефіцієнта затвердіння;  
 $\tau_H / \tau_M = M_\tau$  — масштаб часу затвердіння.

Таким чином,

$$\sqrt{\tau_H} / \sqrt{\tau_M} = M_l / M_K \quad \text{чи} \quad \tau_H = \tau_M \cdot M_l^2 \cdot M_K^{-2}. \quad (8)$$

Ураженіть злитка усадковою раковиною частіше за все виражають не через абсолютну величину усадкової раковини ( $h_{аб}$ ), а через відносну ( $h_{від}$ ) величину, що визначають у відсотках

$$h_{м.від} = (h_{м.аб} / H) \cdot 100, \quad (9)$$

де  $H$  — висота злитка;  $h_{м.аб}$  — глибина проникнення усадкової раковини в злиток (модель).

#### 4.4 Устаткування, що використовується при виконанні роботи

1. Набір плоских холодильників, виготовлених з металу.

Внутрішній контур холодильників відповідає формі подовжніх осьових розрізів виливниць по вертикальній осі. Холодильники охолоджуються циркулюючою в них водою з водопроводу.

2. Пластини з плексигласу і гумові прокладки, які поміщаються між холодильниками і пластинами плексигласів для створення герметичності.

3. Кріпильні пристосування і інші деталі, необхідні для монтажу установки.

4. Гумові шланги для підключення охолоджуючої води і відведення її з холодильників.

5. Судини для плавлення гіпосульфату і воронки для заливки його в моделі.

6. Електропечі.

7. Термометр зі шкалою до 150 °C для виміру температура розплавленого гіпосульфату.

8. Лінійки для виміру товщини шару матеріалу, що твердіє

#### **4.5 Методика і порядок виконання роботи**

Вивчення процесу формування макроструктури в злитках відбувається на чотирьох плоских прозорих моделях, що моделюють подовжній розріз виливниць, розширених догори, з додатковою надставкою і розширеною донизу з плитами утеплювачів (рис.2).

При виконанні роботи учбова група (підгрупа) розбивається на окремі бригади (по 2-3 людини), кожна з яких вивчає необхідні параметри тільки на одній з вказаних моделей (по вказівці керівника роботи).

Оскільки при виконанні завдань окремими бригадами вивчаються протікаючі процеси тільки на якійсь одній моделі, для ознайомлення студентів з впливом на процеси, що вивчаються, інших чинників (форми виливниць, ступені утеплення верху злитка і т.д) - в кінці роботи складається зведена таблиця, в яку заносяться остаточні результати дослідів, проведених всіма бригадами, і проводиться їх порівняння.

Виконання роботи складається з наступних етапів:

а) ознайомлення з інструкцією і методикою виконання роботи;

б) ознайомлення з правилами техніки безпеки при виконанні роботи;

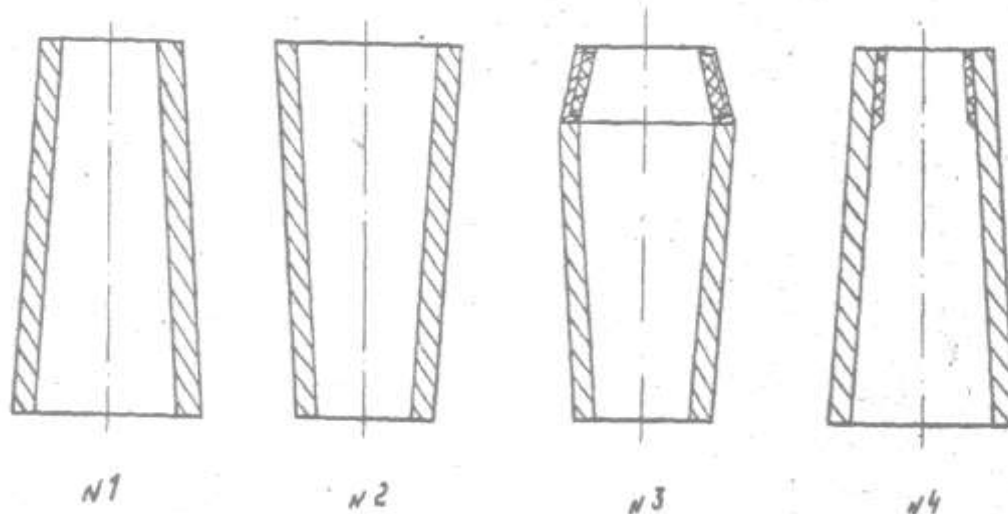


Рис. 2. Виливниці для моделювання процесу формування макроструктури злитка спокійної сталі.

в) розподіл студентів по бригадах і отримання конкретних завдань від керівника роботи;

г) ознайомлення з вживаним при проведенні роботи устаткуванням і підготовка його до проведення дослідів (підключення шлангів і т.д.);

д) підготовка моделюючого матеріалу для проведення дослідів. Гіпосульфит розплавляється в чистій судині на слабкому вогні, не допускається перегрів більше 60-70 С. При цій температурі робиться витримка на протязі 5-ти хв, а потім розплавлений гіпосульфит фільтрується через матерчатий (марлевий) фільтр і знов проводиться вимір температури. Температура гіпосульфиту перед заливкою в моделі повинна знаходитися в межах 55-60°C;

е) заливка розплавленого гіпосульфиту через воронку в моделі, в холодильниках яких циркулює вода;

ж) систематичний (через кожні 5-10 хв) вимір товщини, наростаючої в процесі твердіння кірки. Спостереження за характером руху потоків в матковому розчині і характером формування різних зон макроструктури;

з) зарисовка макроструктури отриманих злитків з дотриманням відповідних масштабів моделі;

і) розрахунок коефіцієнта твердіння моделюючого матеріалу, масштабів моделювання, тривалість кристалізації реального сталевих злитка, а також ураженість злитка усадковою раковиною по формулах (4-7);

к) складання зведеної таблиці (табл. 2) із занесенням в неї остаточних результатів всіх дослідів і узагальнення отриманих даних.

#### **4.6 Зміст звіту про роботу**

Звіт про проведену роботу повинен містити:

- а) назва роботи;
- б) короткий опис мети роботи і методики її проведення;
- в) малюнки отриманих злитків з дотриманням відповідних масштабів моделі, зон макроструктури;
- г) зведену таблицю із занесеними в неї результатами всіх дослідів проведених групою (підгрупою) студентів;
- д) короткий висновок (висновки) за наслідками отриманих даних;
- в) підпис виконавця і дату виконання роботи.

Таблиця 2

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

№ п/п	$\tau_M, c$				$\xi, m$				$K_M, m/c^{0,5}$				$\tau_H, c$				$M_\tau$				Фактори технології розливання	Назва параметрів	Усадкова раковина			
																	$h_{m.ab}, m$	$h_{m.vid}, m$								
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4						
																						Форма виливниці	Уширена донизу			
																								Уширена догори		
																							Умови утеплення верху злитка	Уширена донизу без утеплення		
																								Уширена донизу з утепленням		
																								Уширена догори з додатковою надставкою		

#### **4.7 Правила техніки безпеки при виконанні роботи**

При виконанні справжньої роботи необхідно дотримуватись наступних правил:

1. Плавлення гіпосульфїту повинне здійснюватися в спеціально підготовленій судині.
2. Розливання гіпосульфїту повинне здійснюватися в захисних окулярах і рукавицях, робочий одяг повинен виключати наявність оголених ділянок тіла.
3. Особи, що спостерігають процес заливки гіпосульфїту, повинні знаходитися на відстані не меншого 1 м від моделі.
4. При розливанні дотримувати умови, що виключають розбрикування матеріалу.
5. Не торкатися до електричних проводів і інших струмопровідних частин. Включення і виключення нагрівальних приладів і іншого устаткування проводяться керівником роботи або лаборантом.
6. Не підходити до устаткування і апаратури, на яких не проводиться справжня лабораторна робота.
7. Дотримувати чистоту робочого місця і не відволікатися.

### **ПРАКТИЧНА РОБОТА №5**

#### **«РОЗРАХУНОК ПРОНИКНЕННЯ ГАЗО-ПОРОШКОВОГО СТРУМЕНЯ»**

##### **5.1 Вступ**

Газо-порошкові струмені широко застосовуються у металургійних процесах для рафінування сталі, модифікування, а також для легування і десульфурзації металу. Їх ефективність значною мірою визначається глибиною проникнення у рідкий метал та кількістю часток, що подаються у ванну. На процес впливають такі параметри фурми як: тиск і склад газоносія, вид порошкоподібного матеріалу, розміри часток і фізико-хімічні властивості металу. Тому важливим завданням є проведення розрахунків, які дозволяють

оцінити умови руху струменя, визначити глибину його занурення та ймовірність впровадження часток у розплав.

## 5.2 Мета і зміст роботи

Метою роботи є засвоєння методики розрахунку проникнення газопорошкового струменя у ванну рідкого металу та оцінки умов подачі порошкоподібних часток у розплав.

У ході роботи виконується визначення секундного та додаткового імпульсу струменя, критичної швидкості витікання газопорошкової суміші, середньої густини суміші та глибини її проникнення у метал. Також проводиться аналіз умов, за яких порошкоподібні частки можуть впроваджуватися у розплав, і оцінюється їх кількість у підфурменій зоні. Отримані результати дозволяють краще зрозуміти закономірності руху газопорошкових струменів та їх роль у металургійних процесах.

## 5.3 Загальні положення

### *Розрахунок проникнення газопорошкового струменя у рідку ванну*

У ванну рідкого металу крізь фурму діаметром  $d_\phi$  подається газопорошкова суміш, яку утворюють порошкоподібний матеріал 1 або 2 та газ носій 3 або 4. Розрахувати глибину занурення газопорошкового струменя.

Глибину проникнення газопорошкового струменя можна визначити по формулі, м:

$$h_{cm} = \sqrt{\frac{4 \cdot (i_{cpr} + i_{доп})}{\pi \cdot d_\phi \cdot \rho_m \cdot g}}, \quad (1)$$

де  $d_\phi$  – діаметр фурми, м;  $i_{cpr}$  – секундний імпульс струменя, Н;  $i_{доп}$  – додатковий секундний імпульс струменя, Н;  $\rho_m$  – щільність рідкого металу, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Секундний імпульс струменя визначається по формулі, Н:

$$i_{cpr} = \frac{\pi \cdot d_\phi^2}{4} \cdot \rho_{cm} \cdot (\omega_{кр}^{cm})^2, \quad (2)$$

де  $\omega_{кр}^{см}$  – критична швидкість витікання газо-порошкової суміші на зрізі фурми, м/с;  $\rho_{см}$  – середня щільність суміші, кг/м<sup>3</sup>.

Середня щільність суміші дорівнює, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{см} = \frac{G_{см}}{V_{см}} = \frac{\rho_r \cdot V_r + C \cdot V_r}{V_r + G_p/\rho_p} = \frac{\rho_r + C}{1 + C/\rho_p}, \quad (3)$$

де  $G_{см}$  – масова витрата газо-порошкової суміші, кг/с;  $V_{см}$  – об'ємна витрата суміші, м<sup>3</sup>/с;  $G_p$  – масова витрата порошку, кг/с;  $\rho_r$  – щільність газу, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – концентрація порошку в обсязі газу, кг/м<sup>3</sup>;  $V_r$  – об'ємна витрата газу, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_p$  – щільність порошку, кг/м<sup>3</sup>.

Критична швидкість витікання газопорошкової суміші на зрізі фурми становить, м/с:

$$\omega_{кр}^{см} = \sqrt{2 \cdot \frac{K_{см}}{K_{см} + 1} \cdot p_1 \cdot V_{см}}, \quad (4)$$

де  $V_{см}$  – питомий об'єм суміші, м<sup>3</sup>/кг;  $K_{см}$  – показник адіабати суміші.

Показник адіабати суміші визначається по формулі:

$$K_{см} = \frac{c_p^{см}}{c_v^{см}} = \frac{\mu \cdot c_p^r + (1 - \mu) \cdot c_p}{\mu \cdot c_v^r + (1 - \mu) \cdot c_p} = \frac{c_p^r + a \cdot c_p}{c_v^r + a \cdot c_p}, \quad (5)$$

де  $a = (1 - \mu)/\mu$ ;  $c_p^{см}$ ,  $c_v^{см}$  – відповідно теплоємності газопорошкової суміші при постійних тиску й об'ємі, Дж/(кг·К);  $c_p^r$ ,  $c_v^r$  – відповідно теплоємності газу при постійних тиску й об'ємі, Дж/(кг·К);  $c_p$  – теплоємність порошку, Дж/(кг·К) [ккал/кг·°С];  $\mu$  – масове співвідношення газу в суміші.

Масове співвідношення газу в суміші становить:

$$\mu = \frac{G_r}{G_r + G_n} = \frac{\rho_r}{\rho_r + C}, \quad (6)$$

Масова витрата газопорошкової суміші визначаємо по формулі, кг/с:

$$G_{cm} = G_r + G_n = \rho_r \cdot V_r + C \cdot V_g, \quad (7)$$

де  $G_r$ , – масова витрата газу, кг/с.

Об'ємна витрата суміші становить, м<sup>3</sup>/с:

$$V_{cm} = V_r + (G_n / \rho_n), \quad (8)$$

Додатковий секундний імпульс становить, Н:

$$i_{дон} = \frac{\pi \cdot d_{\phi}^2}{4} \cdot (p_2 - p_0), \quad (9)$$

де  $p_2$  – тиск суміші за фурмою, Па (ат);  $p_0$  – протитиск середовища, у яку відбувається витікання, Па (ат).

При продувці металу газопорошковою сумішшю, зазвичай використовується циліндрична фурма.

При існуючому тиску несучого газу забезпечується критична швидкість витікання газопорошкової суміші. Тоді тиск газопорошкової суміші на зрізі фурми можна визначити по формулі:

$$p_2 = \beta_{кр} \cdot p_1, \quad (10)$$

де  $p_1$  – тиск суміші перед фурмою, Па (ат)

$$\beta_{кр} = \left( \frac{2}{K_{cm} + 1} \right)^{K_{cm}/(K_{cm}-1)}, \quad (11)$$

Протитиск середовища  $p_0$  треба обрати самостійно задаючись глибиною занурення фурми.

### ***Визначення кількості часток, що впровадилися в рідкий метал***

Вважається, що частка газопорошкової суміші впровадилася, якщо вона знижує початкову швидкість після удару від  $\omega_0$  до нуля ( $\omega_2 = 0$ ) на відстані не менш свого діаметра від поверхні металу.

Гранично низьку швидкість частки порошку після удару об поверхню металу, необхідну для її впровадження, можна визначити по рівнянню

$$m_{\text{ч}} \cdot (\omega_{\text{ч}}^2 - \omega_1^2) = (m_{\text{ч}} + m_{\text{м}}) \cdot \omega_1^2 \quad (12)$$

де  $m_{\text{ч}}$  та  $m_{\text{м}}$  – маси частки й металу, що прийшов у рух після удару, кг;  $\omega_{\text{ч}}$  та  $\omega_1$  – гранично низькі швидкості частки до й після удару, м/с.

Після перетворення формула (12) набуває вигляду

$$\omega_{\text{ч}} = \omega_1 \sqrt{\frac{2\rho_{\text{ч}} + 0,5\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{ч}}}}, \quad (13)$$

де  $\rho_{\text{м}}$  та  $\rho_{\text{ч}}$  – густина рідкого металу та густина частки порошкоподібного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

Для визначення гранично низької швидкості частки до удару, необхідної для її впровадження, потрібно визначити, гранично низьку швидкість після удару, що може забезпечити занурення частки в метал на глибину, рівну її діаметру.

$$\omega_1 = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{r_{\text{ч}} \rho_{\text{м}}}} \sqrt{e^{\frac{1,5\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{ч}}}} - 1}, \quad (14)$$

де  $\sigma$  – поверхневий натяг рідкого металу, Н/м;  $r_{\text{ч}}$  – радіус порошкоподібної частки, м

Швидкість часток газопорошкової суміші на зрізі фурми з умови балансу імпульсів становить, м/с:

$$\omega_{\text{ч}}^{\phi} = \omega_{\text{кр}}^{\text{см}} - \frac{\rho_{\text{г}}}{C} (\omega_{\text{кр}} - \omega_{\text{кр}}^{\text{см}}), \quad (15)$$

де  $\omega_{\text{кр}}$  – критична швидкість витікання для газу носія, м/с.

Виходячи з значення  $\omega_{\text{ч}}^{\phi}$  та співвідношення  $\frac{h_{\text{см}}}{d_{\phi}}$  з графіка 1 знаходимо значення осьової швидкості частки поблизу торцевої стінки підфурменої зони ( $\omega_{\text{ч}}^{\tau}$ ).

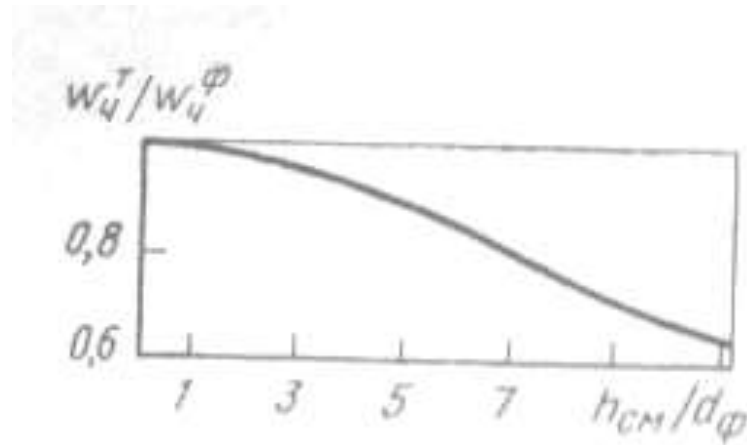


Рис.1. Відносна зміна осьової швидкості часток по довжині газопорошкового струменя

Число часток в  $1 \text{ м}^3$  газопорошкового струменя

$$n_{\text{ч}} = \frac{C}{m_{\text{ч}}}, \quad (16)$$

де  $m_{\text{ч}}$  – маса частки порошкоподібної частки (для розрахунку маси частки її форма у першому наближенні приймається кулеподібною), кг;

Середня відстань між сусідніми частками

$$l = \sqrt[3]{\frac{1}{n_{\text{ч}}}}, \quad (17)$$

Торцевої стінки підфурменної зони одночасно досягає часток

$$n' = \frac{\pi D_T^2}{4l}, \quad (18)$$

де  $D_T^2$  – діаметр торцевої часті підфурменної зони, м; яка розраховується за рівнянням ( $D_T = d_\phi + 2h_{cm} \cdot \text{tg}8^\circ$ )

Використовуючи значення  $\omega'_\phi$  і  $\omega_T$  та знаючи діаметр фурми по рис. 2 знаходимо значення поточного значення радіусу торцевої стінки подфурменної зони ( $r'_T$ ).

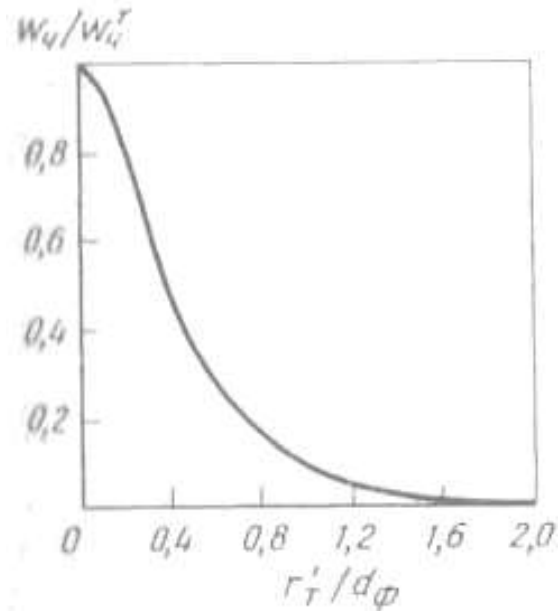


Рис. 2. Відносне змінення швидкості частин по перерізу газопорошкового струменя поблизу торцевої стінки

За умови рівномірного розподілу в обсязі газопорошкового струменя число часток, що мають необхідну для впровадження швидкість, пропорційно відповідним площам або квадратам радіусів торцевої стінки розрахуємо число часток, що одночасно вдаряються о торцеву стінку під фурменної зони та мають швидкість достатню для впровадження у рідкий метал.

$$n'' = \frac{4n'(r'_T)^2}{D_T^2} \quad (19)$$

#### 5.4 Порядок розрахунку

1. Розрахувати секундний імпульс струменя;
2. Розрахувати критичну швидкість витікання газопорошкової суміші на зрізі фурми;
3. Розрахувати додатковий секундний імпульс струменя;
4. Розрахувати глибину проникнення газо-порошкового струменя;
5. Розрахувати гранично низькі швидкості частки до й після удару;
6. Знайти значення осьвої швидкості частки поблизу торцевої стінки підфурменої зони
7. Знайти значення поточного значення радіусу торцевої стінки подфурменої зони
8. Розрахувати число часток, що одночасно вдаряються о торцеву стінку під фурменої зони та мають швидкість достатню для впровадження у рідкий метал

#### 5.5 Вихідні данні для розрахунків

№	Діаметр фурми, мм	Вид порошкоподібного матеріалу	Вид газу носію	Початковий тиск газопорошкової суміші, ат	Масова витрата порошку, кг/с	Масова витрата газу, кг/с	Радіус порошкоподібної частки, мм
1	10	1	3	2	0,5	0,1	0,05
2	15	2	4	2,5	0,6	0,15	0,1
3	20	2	4	3	0,7	0,2	0,15
4	25	1	3	3,5	0,8	0,25	0,2
5	30	1	3	4	0,9	0,3	0,25
6	35	1	3	4,5	1	0,35	0,3
7	40	2	4	5	1,2	0,4	0,35
8	45	2	4	5,5	1,3	0,45	0,4
9	50	1	3	6	1,4	0,5	0,45
10	55	1	3	2	1,5	0,55	0,5
11	60	1	3	2,5	1,6	0,6	0,55
12	65	1	3	3	1,7	0,65	0,6
13	70	2	4	3,5	1,8	0,7	0,65

№	Діаметр фурми, мм	Вид порошкоподібного матеріалу	Вид газу носію	Початковий тиск газо- порошкової суміші, ат	Масова витрата порошку, кг/с	Масова витрата газу, кг/с	Радіус порошко- подібної частки, мм
14	75	2	4	4	1,9	0,75	0,7
15	10	1	3	4,5	2	0,8	0,75
16	15	1	3	5	2,1	0,85	0,8
17	20	1	3	5,5	2,2	0,9	0,85
18	25	2	3	6	2,3	1	0,9
19	30	2	4	3,5	2,4	0,9	0,95
20	35	1	4	4	2,5	0,8	0,1
21	40	1	3	4,5	0,5	0,7	0,95
22	45	1	3	5	0,6	0,6	0,9
23	50	2	3	5,5	0,7	0,5	0,85
24	55	2	4	6	0,8	0,4	0,8
25	60	1	4	4	0,9	0,3	0,75

1 — порошкоподібний матеріал графіт;

2 — порошкоподібний матеріал вапно;

3 — газ носій азот;

4 — газ носій аргон.

Відсутніми даними задатися з використанням довідкової літератури.

Навчально-методичне видання

**Стоянов** Олександр Миколайович,  
**Синегін** Євген Володимирович,  
**Рубан** Володимир Олександрович,  
**Журавльова** Світлана Валеріївна

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ПРОЦЕСІВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА**

Навчально-методичні рекомендації  
до практичних занять

Електронне видання

Експертний висновок склав канд. техн. наук, доц. Валерій МАМЕШИН

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 67 від 03.10.2025)

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка В. О. Рубан

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 2,32. Обл.-вид. арк. 2,35.  
Зам. № 107.

Видавець: Український державний університет науки і технологій.  
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:  
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010