**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М.ПОТЕБНІ**

Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

# Кваліфікаційна робота / проєкт

перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

на тему **Дослідження в'язкості шлаків для виготовлення інструментальних швидкорізальних сталей методами ЕШП**

Виконав: студент IV курсу, групи 6.1362-м-з
спеціальності 136 Металургія
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Металургія
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
А.О.Кучеревський
(ініціали та прізвище)

Керівник проф., д.х.н, проф. Прутцьков Д.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент доц., к.т.н., доц. Нестеренко Т.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 136 Металургія
(код та назва)
Освітня програма Металургія
(код та назва)
Спеціалізація
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри_____
«_____»_____20____року

**З А В Д А Н Н Я**
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЄКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Кучеревському Андрію Олексійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Дослідження в'язкості шлаків для виготовлення інструментальних швидкорізальних сталей методами ЕШП

керівник роботи Прутцьков Дмитро Володимирович, д.х.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року №1831-с

2 Строк подання студентом роботи 25.05.2026

3 Вихідні дані до роботи Дослідити в'язкість шлаків в процесах електрошлакового переплаву

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Реферат; вступ; 1 Загальна частина; 2 Конструкційна частина; 3 Технологічна частина; 4 Охорона праці та техногенна безпека; Висновки; Перелік джерел посилання

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
13 креслень

6 Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| 1 Загальна частина | Прутцьков Д.В., професор | | |
| 2 Конструкційна частина | Прутцьков Д.В., професор | | |
| 3 Технологічна частина | Прутцьков Д.В., професор | | |
| 4 Охорона праці та техногенна безпека | Прутцьков Д.В., професор | | |
| | | | |

7 Дата видачі завдання_____

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1 | Вступ, реферат | 13.04-22.04.2026 | |
| 2 | 1 Загальна частина | 23.04-30.04.2026 | |
| 3 | 2 Конструкційна частина | 01.05-08.05.2026 | |
| 4 | 3 Технологічна частина | 09.05-16.05.2026 | |
| 5 | 4 Охорона праці та техногенна безпека | 17.05-23.05.2026 | |
| 6 | Висновки, перелік джерел посилання | 24.05-25.05.2026 | |
| | | | |

Студент _____ _____А.О.Кучеревський_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____ _____Д.В.Прутцьков_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер _____ _____Ю.О.Бєлоконь___
(підпис) (ініціали та прізвище)

# РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 91 с., 13 табл., 11 рис., 25 джерел

ШЛАК, ЕЛЕКТРОШЛАКОВИЙ ПЕРЕПЛАВ, КОМПОНЕНТ, ТЕМПЕРАТУРА, ОСНОВНІСТЬ, ОКСИД, В'ЯЗКІСТЬ, КОЛИВАННЯ, СТРУКТУРНОЧУТЛИВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Мета роботи – дослідити в’язкість шлаків для виготовлення інструментальних швидкорізальних сталей методами ЕШП.

В загальній частині наведено сортамент сталей, загальний опис цеху спеціальної металургії та технологія плавки ЕШП, описана технологія підготовки матеріалів до плавки.

В конструкційній частині визначені конструкції основних агрегатів, наведений опис печі У-436 та флюсо-плавильної печі У-360М, проведений розрахунок кількості печей.

В технологічній частині наведені теоретичні засади в'язкості та моделі для прогнозування фізико-хімічних та технологічних металургійних розплавів; представлена загальна характеристика вібровіскозиметрів та проведені дослідження віскозиметрії металургійних розплавів; проведений розрахунок в'язкості металургійних шлаків за теорією Е.В.Приходька.

У частині «Охорона праці та техногенна безпека» проведений аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища цеху спецелектрометалургії, розроблено заходи захисту від впливу небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища цеху.

ЗМІСТ

Вступ ..... 7
1 Загальна частина ..... 9
1.1 Сортамент цеху ..... 10
1.2 Опис цеху спеціальної електрометалургії ..... 13
1.2.1 Пічний проліт ..... 14
1.2.2 Розрахунок кількості мостових кранів ..... 15
1.2.3 Допоміжний проліт ..... 17
1.2.4 Проліт ад'юстажу ..... 18
1.3 Технологія плавки ЕШП ..... 19
1.3.1 Підготовка кристалізатора й електрода ..... 21
1.3.2 Приварювання електродів до інверсної голівки ..... 23
1.3.3 Захист поверхні електродів ..... 23
1.3.4 Підготовка печі ..... 23
1.3.5 Контроль й управління процесом ЕШП ..... 25
1.3.6 Охолодження злитків ..... 26
1.4 Підготовка матеріалів до процесу ЕШП ..... 26
1.4.1 Фізико-хімічні основи виплавки електродів марки Р6М5 ..... 27
1.4.2 Вибір флюсу ..... 28
1.4.3 Плавлення флюсів у флюсо-плавильній печі ..... 29
1.4.4 Самоплавкий екзотермічний флюс ..... 30
1.4.5 Повторне використання флюсів ..... 30
2 Конструкційна частина ..... 32
2.1 Визначення конструкції основних агрегатів ..... 32
2.2 Опис печі У-436 ..... 33
2.3 Визначення кількості печей ..... 38
2.4 Флюсо-плавильна піч У-360М ..... 40
3 Технологічна частина ..... 42
3.1 Теоретичні засади в'язкості металургійних розплавів ..... 43
3.1.1 Загальна характеристика явища в'язкості ..... 43

3.1.2 В'язкість металургійних шлаків та її особливості ..... 44
3.2 Моделі для прогнозування фізико-хімічних та технологічних властивостей металургійних розплавів ..... 47
3.2.1 Емпіричні моделі в'язкості рідких шлаків ..... 47
3.2.2 Модель Е.В. Приходька ..... 50
3.3 Віскозиметрія металургійних розплавів ..... 59
3.3.1 Методи виміру в’язкості металургійних розплавів ..... 59
3.3.2 Метод капілярної течії ..... 60
3.3.3 Метод тіла, що рухається в рідині ..... 61
3.3.4 Ротаційні методи ..... 63
3.3.5 Методи крутильних коливань ..... 64
3.3.6 Суперечливість даних щодо в'язкості шлакових розплавів ..... 67
3.4 Розрахунок в'язкості металургійних шлаків за теорією Е.В.Приходька ..... 68
3.4.1 Модель шлаку як системи неполяризованих іонних радіусів ..... 68
3.5 Загальна характеристика вібровіскозиметрів ..... 69
3.6 Опис встановлення та методики вимірювань ..... 70
3.7 Зіставлення даних по в'язкості шлаків, отриманих з теорії Е.В. Приходько з даними, отриманими на вібровіскозиметрі ..... 72
4 Охорона праці та техногенна безпека ..... 77
4.1 Аналіз потенційний шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища цеху спецелектрометалургії ..... 77
4.2 Заходи з електробезпеки ..... 81
4.3 Заходи пожежної безпеки ..... 83
4.4 Технічні заходи виробничої санітарії ..... 84
4.4.1 Освітлення виробничих приміщень ..... 84
4.4.2 Опалення і вентиляція ..... 85
4.5. Розрахунок аерації цеху ..... 86
Висновки ..... 88
Перелік джерел посилання ..... 90

# ВСТУП

За останнє десятиліття світовий ринок металургії значною мірою подолав кризовий стан. Світове виробництво сталі досягло рекордних показників у 1,61 мільярда тонн, що на 15% більше, ніж у 2010 році. Швидке відновлення основних центрів металургії стало можливим завдяки впровадженню масштабних державних програм розвитку інфраструктури та підтримки автомобільної галузі, зокрема в Китаї, Індії, США та Бразилії.

Попит на метал в Китаї зростає щороку на 15%, тоді як глобальне виробництво сталі збільшується на 5% і вже досягло рівня 1,6 мільярда тонн. Одночасно суттєво підвищуються ціни на метал: лише впродовж 2011–2016 років вони зросли більш ніж утричі. Крім того, значно подорожчала основна металургійна сировина – залізна руда, кокс, металобрухт тощо, що спричинило зростання виробничих витрат металургійної промисловості в усьому світі. Втім, провідні металургійні компанії завершили 2022 рік із суттєвими прибутками.

Ці оновлення значною мірою стимулюють китайський експорт, що створює додатковий тиск на конкурентів. Металургійна промисловість таких країн, як Японія та Південна Корея, вже зіткнулася з наслідками цього впливу. Водночас Китай стає дедалі більше залежним від імпорту металургійної сировини. Наприклад, якщо в 1995 році поставки залізної руди з Бразилії та Австралії до Китаю становили лише 9% глобальної торгівлі цією сировиною, то у 2018 році їх частка досягла 25%.

Зміни світового попиту та оптимізація використання різних видів ресурсів поступово призводять до того, що традиційна металургія повного циклу поступається місцем малим металургійним підприємствам. Це зумовлено низкою факторів: скороченням потреби у великих обсягах однорідного металу через завершення індустріалізації в багатьох країнах, зменшенням металоємності продукції машинобудування, зниженням концентрації виробництв, упровадженням різноманітніших сортиментів продукції та зростанням ефективності електросталеплавильних технологій і методів прямого відновлення заліза.

Протягом минулого століття виробництво чорних металів демонструвало динамічне зростання. У 1950 році світове виробництво сталі сягнуло 200 мільйонів тонн на рік, до 1965 року – зросло до 500 мільйонів тонн, а у 1985 році – до 700 мільйонів тонн. Наприкінці 2000 року сталеплавильна галузь перевищила показник у 1 мільярд тонн виробництва на рік.

Проте через технологічну відсталість готова металопродукція з України продовжує втрачати конкурентоспроможність на міжнародних ринках. Основними причинами технологічного відставання чавунолитейної промисловості країни є такі показники:

- Загальний обсяг прокату холоднокатаного листа для автомобільної промисловості в Україні становить лише близько 5 %, тоді як у європейських країнах цей показник перевищує 50 %.

- Частка безперервно розлитої сталі в Україні сягає лише 39 % від загального виробництва. Для порівняння: у Німеччині цей показник становить 90 %, у Японії – понад 95 %, а в Південній Кореї досягає 100 %.

- У розвинених країнах металургійне обладнання оновлюється повністю кожні 15–20 років. У Німеччині та Японії на виробництвах немає агрегатів, які працюють понад 20 років, тоді як на українських заводах досі використовуються печі, побудовані ще до початку Другої світової війни.

Втрати сталі під час виробництва гарячого прокату в Україні становлять приблизно 30 %, тоді як у США – 18 %, у Німеччині – 9 %, у Японії – 5 %, а в Південній Кореї всього 1 %.

Витрати коксу на одну тонну чавуну в Україні складають 550 кг, що значно перевищує показники розвинених країн, де потрібні лише 250–300 кг.

# 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Останнім часом значного розвитку набула так звана спеціальна електрометалургія, яка забезпечує отримання високоякісної сталі завдяки застосуванню технологій вакуумно-дугового переплаву (ВДП) і електрошлакового переплаву (ЕШП). Підприємства, які мають у своєму розпорядженні спеціалізовані цехи для такої електрометалургії, є значно конкурентоспроможнішими порівняно з тими заводами, що не мають можливості виготовляти сталь високої якості через відсутність технологій ЕШП і ВДП.

Для подальшого розвитку вітчизняної промисловості необхідно впроваджувати на металургійних підприємствах розробку і будівництво нових електросталеплавильних цехів із середньою та малою продуктивністю, від 40 до 100 тисяч тонн сталі на рік. Це відкриє для підприємств нові перспективи у виробництві сталі. Тим більше, сама технологія та процес отримання зливків методом ЕШП не є надзвичайно складними. У цій кваліфікаційній роботі передбачено розробка технології ЕШП з впровадженням у виробництво цеху потужністю 60 тисяч тонн сталі на рік та дослідження в’язкості шлаків процесу ЕШП.

На сьогодні основним завданням спеціальної електрометалургії є суттєве підвищення якості металів, надання їм нових унікальних властивостей і водночас зменшення шкідливого впливу металургійного виробництва на довкілля.

Традиційно процес отримання якісного зливка умовно поділяється на дві взаємопов’язані стадії: перша включає отримання рідкого металу з визначеним хімічним складом, очищеного від неметалевих та газових включень і шкідливих домішок, тоді як друга – це кристалізація металу в умовах, які забезпечують формування зливка з однорідною кристалічною структурою, максимальної щільності та високої якості поверхні. Важливо зазначити, що саме поява такої галузі, як спеціальна електрометалургія, дозволила ефективно вирішувати ці два завдання одночасно. Основною ознакою більшості процесів СЕМ є послідовне, ретельне очищення металу під час переплаву та його поступове заповнення водоохолоджуваного кристалізатора. Це забезпечує спрямовану кристалізацію

зливка, що відрізняється високою якістю, однорідністю та відсутністю ліквацийних дефектів.

Для рафінувального переплаву використовуються заготовки, попередньо отримані традиційними способами з металів, виплавлених у електродугових, індукційних, мартенівських або конвертерних печах. Також застосовують відходи металообробної промисловості та спеціальні деталі. Під час переплаву заготовок з металу знижується вміст газів, шкідливих домішок і неметалевих включень. Завдяки постійному процесу підживлення новими порціями рідкого металу та специфіці теплових і фізичних особливостей кристалізації розплаву значно покращуються як мікроструктура, так і макроструктура. Також усувається хімічна та фізична неоднорідність злитків.

Електрошлакова технологія вирізняється високою економічністю і широким діапазоном технічних можливостей. Спочатку цей метод зародився для отримання злитків металу круглої, квадратної, а згодом і прямокутної форми. Згодом електрошлакова технологія була вдосконалена і привела до появи електрошлакового лиття, яке має значний вплив на виробництво заготовок і деталей для машинобудування. Це стало можливим завдяки суттєвій економії металу та значному скороченню витрат на механічну обробку. Ступінь десульфурації металу в процесі електрошлакового переплаву у відкритому кристалізаторі сягає приблизно 80%.

Також приблизно 80% кисню видаляється під час цього процесу, що, як і усунення сірки, є важливим фактором для підвищення якості металу у готових виробах.

## 1.1 Сортамент цеху

Інструментальна швидкорізальна сталь Р6М5 є високолегованою сталлю, яка переважно використовується для виготовлення різального інструменту. Її головною особливістю є здатність ефективної роботи на швидкостях, що перевищують показники інструментів з вуглецевої сталі приблизно у 3-5 разів. Це стає можливим завдяки властивості червоностійкості швидкорізальної сталі, яка

забезпечує збереження твердості навіть при високих температурах.

Інструмент із цієї сталі починає втрачати свої механічні характеристики при нагріванні понад 550—650°С (в залежності від складу та термічної обробки). Для порівняння, інструменти з вуглецевої сталі пом'якшуються вже при температурі близько 200 °С. Хімічний склад сталі Р6М5 представлений згідно з ГОСТ 19265-73 у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі Р6М5

| Вміст елементів, % | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | Cr | Mo | V | W | Ni | S | P | Si | Mn | Co |
| | | | | | | | | не більше | | |
| 0,82-0,90 | 3,80-4,40 | 4,80-5,30 | 1,70-2,10 | 5,50-6,50 | 0,40 | 0,025 | 0,030 | 0,50 | 0,50 | 0,50 |

Інструменти, виготовлені з швидкорізальних сталей, застосовуються для обробки металу на високих швидкостях і за умов значного нагріву робочої кромки. Вони мають відповідати низці вимог, зокрема забезпечувати високу твердість, міцність, зносостійкість, корозійну стійкість, стабільність розмірів і форми протягом тривалого часу, а також витримувати значні динамічні навантаження. Це означає, що такі сталі повинні характеризуватися високим опором руйнуванню, твердістю (як у холодному, так і в гарячому стані) та червоностійкістю.

Високу твердість у холодному стані демонструють також вуглецеві інструментальні сталі. Однак вони не здатні забезпечити ефективну роботу при високошвидкісному різанні. На рисунку 1.1 зображено криві, що показують зміну твердості вуглецевих і швидкорізальних сталей у процесі випробувань за підвищених температур. За нормальної температури вуглецева сталь має навіть трохи вищу твердість порівняно зі швидкорізальною сталлю. Однак під час роботи ріжучого інструменту відбувається значне тепловиділення, з якого до 80% тепла спрямовується на нагрів інструменту. Це призводить до відпускання матеріалу та зниження його твердості.

При нагріванні до 200 °С твердість вуглецевої сталі стрімко зменшується. Тому такі сталі не придатні для режимів різання, що спричиняють підвищення температури понад 200 °С. У швидкорізальних сталей висока твердість зберігається навіть при температурі 500–600 °С, що робить інструменти з них значно продуктивнішими порівняно з вуглецевими сталями.

Гаряча твердість визначає здатність сталі витримувати високі температури, тоді як красностійкість характеризує тривалість її стабільної роботи за таких температур. Відповідно, це показує, наскільки довго загартована та відпущена сталь може протистояти втраті міцності при нагріванні.

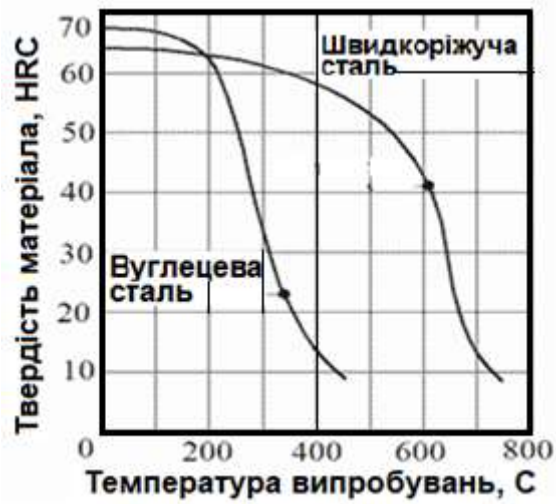
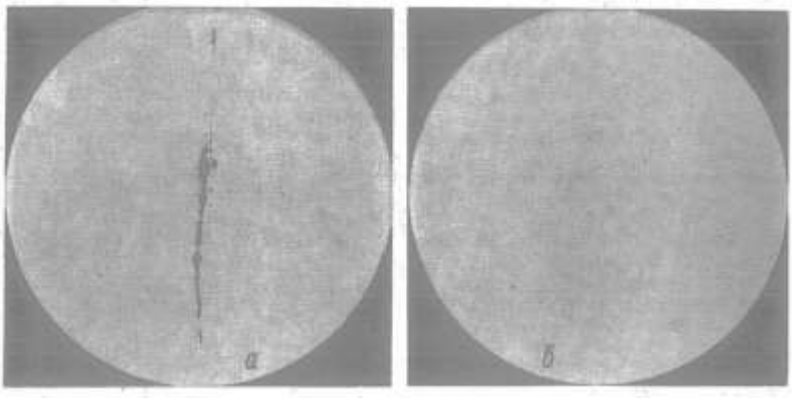



Рисунок 1.1 - Твердість інструментальних сталей при підвищених температурах

Окрім високої твердості, матеріали для ріжучого інструменту мають відповідати й високим механічним вимогам. Це передбачає стійкість до крихкого руйнування, оскільки за твердістю, що перевищує 60 HRC, руйнування завжди відбувається за крихким механізмом. Міцність таких високоміцних матеріалів зазвичай визначається опором руйнуванню під час вигину призматичних, не надрізаних зразків, як у режимі статичного (повільного), так і динамічного (швидкого) навантаження. Чим вища міцність матеріалу, тим більше зусиль здатна витримати робоча частина інструмента, що дозволяє застосовувати більшу подачу та глибину різання. У результаті це суттєво підвищує ефективність процесу обробки.

Сталь марки Р6М5 повинна відповідати найвищим стандартам якості для виконання своїх функцій. Для досягнення таких вимог застосовується метод електрошлакового переплаву. На рисунку 1.2 представлено мікроструктуру сталі Р6М5, збільшену в 100 разів, де добре видно неметалічні включення у злитках, отриманих за допомогою виплавки в печах ДСП (а) та ЕШП (б).




а - метал виплавлений в ДСП (бал 4);

б - метал переплавлений в печі ЕШП (бал 1)

Рисунок 1.2 - Неметалічні включення в сталі Р6М5 (х100)

Якщо порівнювати процес електрошлакового переплаву (ЕШП) із іншими методами спеціальної електрометалургії, такими як вакуумно-дуговий переплав (ВДП), електронно-променева переплавка (ЕПП) чи вакуумно-індукційний переплав (ВІП), то його особливість полягає в використанні змінного струму промислової частоти. Це дозволяє застосовувати прості та надійні трансформатори як джерело живлення замість масивного та коштовного обладнання, яке необхідне для роботи процесів типу ВДП, ЕПП чи ВІП. Окрім того, ці технології функціонують у вакуумному середовищі з низьким тиском, що вимагає дорогого вакуумного обладнання та висококваліфікованого персоналу для обслуговування.

## 1.2 Опис цеху спеціальної електрометалургії

Цей цех призначений для виробництва інструментальної швидкорізальної сталі, яка матиме низький вміст неметалічних включень, сірки та фосфору,

завдяки процесу плавлення у печах ЕШП. Основне виробництво здійснюватиметься в печі У-436. Для забезпечення роботи основних агрегатів планується монтаж флюсоплавильних печей типу У-360М.

Відповідно до технічних умов і проєктної документації з будівництва цехів, конструктивні елементи передбачають наступне:

- Стіни цеху будуть виготовлені із залізобетонних плит шириною 6 метрів і висотою 1,5 метра.

- Зовнішні колони встановлюватимуться з кроком 6 метрів.

- Внутрішні колони — з кроком 12 метрів. Усі колони матимуть прямокутну форму розміром 300 х 300 мм.

- Підлога складатиметься з бетонного фундаменту, на поверхню якого насипатимуть шар піску. На цей шар укладатимуть металеві плити завтовшки 60 мм і розміром 300 х 300 мм згідно з нормативами СНиП 2.03.13-88 (Поли й норми проектування).

- Вікна будуть розташовані на висоті 1,5 метра від підлоги. Кожне вікно матиме розмір 600 х 300 мм.

- Відстань між колонами становитиме 6 метрів.

Для транспортування устаткування та матеріалів для виготовлення злитків передбачено використання двох передавальних візків, розрахованих на вантажопідйомність 30 тонн. Ці візки курсуватимуть між прольотами та знаходитимуться на початку кожного прольоту з лівого і правого боку.

Запланований цех поділятиметься на три основні прольоти: 1. Пічний проліт 2. Допоміжний проліт 3. Проліт ад’юстажу.

### 1.2.1 Пічний проліт

Цей проліт обладнаний шістьма печами ЕШП типу У-436 та чотирма флюс-плавильними печами типу У-360М. З урахуванням габаритів основного обладнання (ширина 4,2 метра, довжина 8,5 метра, висота 11,7 метра) і необхідності додаткового простору для завантаження та вивантаження електродів, кристалізаторів, визначено ширину прольоту в 27 метрів та висоту до верхньої

рейки в 19 метрів. Робочий простір становить 5,5 метра, а відстань між печами — 1,5 метра.

Додатково в прольоті передбачено місце для кантувателя електродів, який забезпечує перевертання електродів із горизонтального у вертикальне положення. Простір також буде використовуватися для охолодження злитків у кристалізаторах, їх заміни в печах. Планується встановлення кількох стелажів для зберігання електродів і кристалізаторів.

У пічному прольоті передбачений в'їзд для составів і автомобілів. Для цього запланована установка варти розмірами 4,8 х 5,4 метра та вхідних дверей розмірами 1,5 х 2,3 метра. Для обслуговування прольоту використовуватимуться мостові крани з вантажопідйомністю 30/5 тонн.

### 1.2.2 Розрахунок кількості мостових кранів

Визначаємо загальну добову продуктивність цеху.

Оскільки одна піч ЕШП за вісім годин виробляє один злиток масою 12 тонн, то відповідно одна піч У-436 за цей же час виконує три плавки загальною вагою 36 тонн.

$$24/8=3 \qquad (1.1)$$

де 24- число годин у добу

8- кількість часу на плавлення 1-ї плавки (злитку)

Таким чином, виходить, що одна піч за добу виготовляє три злитки. Відповідно, вона зупиняється тричі, витрачаючи по 20 хвилин на заміну кристалізаторів та електродів.

Перевіримо наші розрахунки з урахуванням міжплавочних простоїв:

$$n_1= 24-(0,3\cdot 3) = 23,1 \text{ год} \qquad (1.2)$$

$$n_1=23/\ 8 = 2,87$$

Отже, 1 піч ЕШП У-436 виробить в добу три плавки масою 36 тон. Таким чином, 5 печей вироблятимуть:

$$5 \cdot 3 = 15 \text{ плавок масою } 180 \text{ тонн.} \quad (1.3)$$

Потім, знаходимо час витрати кранів на роботу:

Час витрати роботи мостових кранів:

1. Заміна електродів……..……10 хв.
2. Подача інструментів …….…….……4 хв.
3. Заміна кристалізаторів…….…….……10 хв.
4. Захват й подача флюсів до флюсо-плавильної печі……..…….……7 хв.
5. Захват ковш-печі й подача її до печі ЕШП…….……..……...10 хв.
6. Заправка печі …….…….……..5 хв.
7. Зняття з печі У-436 заповненого кристалізатора для охолодження…..……..…...…….5 хв.
8. Підрив й переміщення на візок готового злитка…….……...……..7хв.
9. необлікований час……..…….……..…11хв.

Разом 69 хв.

Загальний час використання $\tau_c$ вираховується:

$$\tau_c = 69 \cdot 38{,}2 = 2635{,}8, \quad (1.4)$$

де 38,2 – кількість операцій у цеху , серед яких 15 плавок у печах У-436;

69 - час витрати кранів на роботу , хв.

15 плавок у печах У-360М й 8,2 допоміжних операцій

Кількість кранів по коефіцієнту завантаження:

$$n = \frac{\tau_c}{1440 * 0.8} = \frac{2635.8}{1440 * 0.8} = 2.28, \quad (1.5)$$

де $\tau_c$ - загальний час витрати кранів.

До парку передбачається отримати два крани. Враховуючи, що один із них буде резервним для ремонтних потреб, у робочому циклі фактично функціонуватимуть три крани.

Після визначення необхідної кількості кранів проводиться перевірка їх завантаженості відповідно до графіка

$$\eta_ф \frac{\tau_c}{n_n * 1440} * 100\% \quad (1.6)$$

Де , $n_n$ - кількість розрахованих нами кранів

$$\frac{2635.8}{3 * 1440} * 100 = 61.01\%$$

По відношенню до вірогідного часу праці

$$\eta_ф \frac{\tau_c}{b * n_n * 1440} * 100\% \quad (1.7)$$

$$\frac{2635.8}{0.8 * 3 * 1440} * 100 = 76,27\%$$

1.2.3 Допоміжний проліт

У прольоті встановлена дробарка для подрібнення частинок флюсу. Також там розміщено муфельну піч ОКБ-90, анодно-механічний верстат для обрізки електродів (АМС), машину для щіткового очищення, верстат для приварювання інвентарної

головки ОБ-670, а також дві термічні печі з викатними піддонами. Кожна з них має площу поду 18,6 м² і максимально допустиму вагу садки до 55 тонн.

У допоміжному прольоті передбачено бункери для зберігання флюсів. Їхній об’єм обчислюється за такою формулою, м³:

$$V = \frac{Q_д * К_з}{q * h} \quad (1.8)$$

де $Q_д$ – добова витрата матеріалу, т/діб: 15·0,7=10,5

де 15 – кількість плавок на добу;

0,7 т – маса флюсу при використанні кристалізатору III типу з найбільшою його потребою;

$К_з$ – норма запасу матеріалу в бункері дорівнює в середньому 6 діб;

q – величина насипної маси матеріалу в бункері приймається 1,6 т/м$^3$ по найважчому матеріалу вапняку;

h – коефіцієнт заповнення бункера, рівний 0,8 для сипучих матеріалів.

$$\frac{10,5 * 6}{1,6 * 0,8} = 49,2$$

Цей проліт обслуговується мостовими кранами вантажопідйомністю 30/5 тонн. Кількість кранів обирається такою ж, як і у пічному прольоті, тобто у допоміжному прольоті також буде три мостові крани. Ширина прольоту становить 24 метри, а висота до головної підкранової колії – 11 метрів.

### 1.2.4 Проліт ад’юстажу

У цьому прольоті заплановано встановлення:

- Двох стрічкових напівавтоматичних пилок консольного типу з поворотною рамою LK G4250/70 для обрізання готових злитків. Ці верстати призначені для розрізання заготівок великого діаметру з міцних сталей.

- Наждакового верстата КЖ16Б61 для обробки поверхонь готових виливків у поєднанні з двома обдирними верстатами моделі 9340А.

Окрім цього, у прольоті будуть розміщені 6 ковпаків для охолодження готових злитків. Абразивна обробка квадратних поковок проводитиметься на верстаті моделі SFXKP-630 від компанії "ГенріхРау", у той час як смугові профілі оброблятимуться на верстаті моделі 2728ПС.

Обслуговування прольоту забезпечуватимуть три мостові крани вантажопідйомністю 30/5 тонн. Розміри прольоту становлять: ширина — 24 метри, висота до головної підкранової колії — 9 метрів.

## 1.3 Технологія плавки ЕШП

Електрошлакове переплавлення проводиться у чотири послідовні етапи:

- Заливання розплавленого шлаку у кристалізатор.
- Запуск і налагодження процесу.
- Основний етап переплавки.
- Додавання додаткового матеріалу (підпитка).

Процес заливання шлаку здійснюється за допомогою сифона. При цьому використовується ступінь напруги печі на рівні 10-15, а процедуру припиняють одразу після появи електричного струму в ланцюзі електродів. Для виконання заливки застосовується спеціальне обладнання — кантователь. Дуже важливо, щоб час від моменту вимкнення печі для шлаку до закінчення заливки не перевищував 10 хвилин.

Після завершення заливки розпочинається процес розведення. Його метою є стабілізація режиму переплаву. Це досягається шляхом формування шлакової ванни та створення своєрідних "конусів" на торцях електродів, занурених у шлак. Вмикання двигунів обертання стрічок швидкості та опору проводиться одночасно з відключенням печі.

Коли у мережі електродів з'являється струм, робиться витримка тривалістю 1-5 хвилин, після чого поступово протягом наступних 10-15 хвилин збільшується подача потужності.

Налаштування сили струму і рівня напруги виконують так, щоб протягом 10-20 хвилин розведення був досягнутий стабільний (бездуговий) режим переплаву. Це забезпечується шляхом коригування швидкості подачі електродів, яка має становити 30-80 В за шкалою відповідного приладу.

Опір міжелектродного простору, визначений згідно з положенням шаблону, встановленого після завершення розводки, вважається початковим для даної плавки. Рекомендовано, щоб цей опір перебував у межах від 14,5 до 16,5 В.

Під час процесу розведення стабільність режиму суворо не регламентується. Тривалість розведення не повинна перевищувати 30 хвилин, при цьому величина оплавленої ділянки електродів не може перевищувати одного поділу на шкалі колони.

Беручи до уваги технічні відмінності печей, допускається відхилення від заданих програм у межах 10,5 В. Оперативний контроль плавлення здійснюється на основі порівняння фактичного перебігу процесу із контрольним графіком.

У випадку невідповідності фактичного перебігу плавки контрольному рівню шлакоутворення (0,30 мм) дозволяється виконувати переключення на дві ступені напруги. Наступні плавки дозволяється проводити виключно при забезпеченні справної роботи системи автономного регулювання.

Під час переходу на підпитування дозволяється змінювати величину оплавленої ділянки електродів на одне поділення шкали колони. Зміна параметрів завдання та переключення ступенів напруги виконується поступово протягом не менше ніж 60 хвилин. Протягом підпитування має бути сплавлена ділянка електродів величиною від 1,0 до 2,0 поділень шкали колони.

Загальна тривалість підпитування повинна складати від 60 до 80 хвилин. Довжина залишків електродів не повинна бути меншою за 100 мм, а середня швидкість занурення електродів має становити щонайменше 100 мм на годину.

Моніторинг метрологічного забезпечення процесу забезпечує служба ВТК цеху. У разі відколу або падіння в кристалізатор частин електродів чи інших сторонніх предметів плавку необхідно негайно зупинити і повністю анулювати результати.

### 1.3.1 Підготовка кристалізатора й електрода

У цех із печами ЕШП електроди надходять з інших сталеплавильних цехів, де вони були виготовлені в дугових сталеплавильних печах (ДСП), відповідно до технологічних вимог. Окрім того, електроди можуть постачатися з передільних, прокатних або ковальських цехів, де їх попередньо виробляли в сталеплавильних печах або ж вони були визнані бракованими.

Після надходження електродів у цех начальник зміни разом зі сталеваром здійснюють їхній огляд. У разі виявлення нерівностей або викривлень, електроди відправляють на коригувальний прес, де їх вирівнюють, а потім піддають зачистці чи обробці для видалення окалини та незначних зовнішніх дефектів. Після цього до рівного й очищеного електрода приварюють інверсну головку, після чого його передають у піч для подальшої обробки.

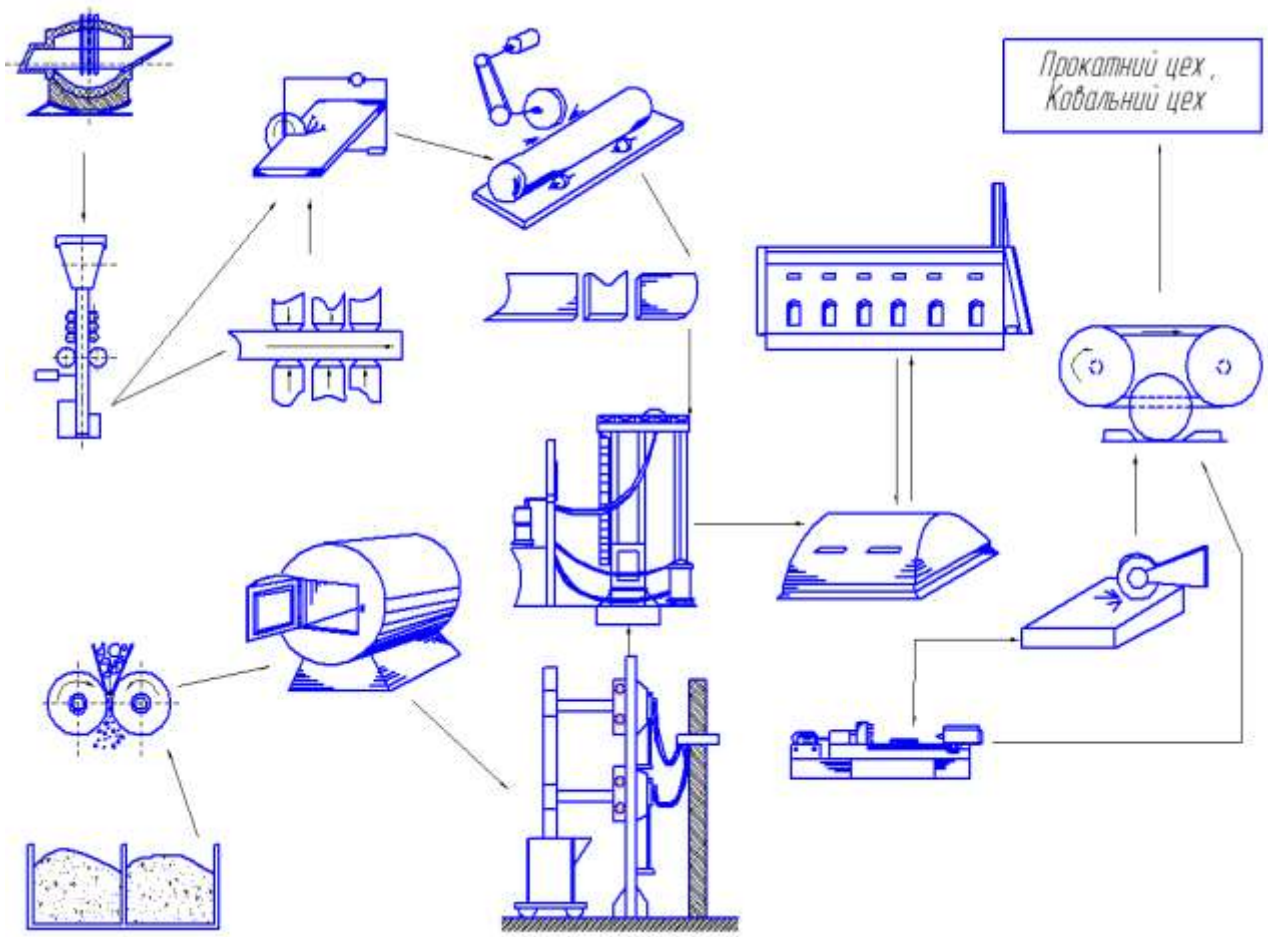
Технологічна схема виробництва швидкорізальної сталі Р6М5 подана на рисунку 1.3.

З метою забезпечення точності хімічного складу металу та підвищення його якості дозволяється застосовувати метод парної комплектації ЕШП. У цьому випадку до одного кристалізатора завантажують два електроди одного типу та розміру, які відрізняються за хімічним складом або властивостями.

Якщо під час переплавлення використовуються електроди без попереднього видалення окалини з їхньої поверхні, шлакову ванну розкислюють алюмінієм у розрахунку 0,20 кг на тонну металу.

При переплавці металу, легованого титаном, шлакову ванну розкислюють у розрахунку 0,7 кг алюмінію на тонну. У разі, якщо вміст титану в електродах перевищує верхню межу на 30 % або більше, переплав виконують без додаткового розкислення.

Алюмінієві прутки встановлюють вздовж стінок кристалізатора. Кількість прутків діаметром 10 мм залежно від норми розкислення наведена у таблиці 1.2.




1 - Піч ДСП; 2 – МБЛЗ; 3 – Правильний прес; 4 – Анодно-механічний верстат; 5 – Абразивний верстат; 6 – Верстат приварювання інвертної голівки; 7 – Бункера для флюсів; 8 – Дробарка; 9 – Муфільна піч; 10 – Флюсо-плавильна піч; 11 – Піч ЕШП; 12 – Термічна піч; 13 – Ковпаки охолодження; 14 – Обдирний верстат; 15 – Наждаковий верстат; 16 – Стрічко-пиляльний верстат

Рисунок 1.3 - Технологічна схема виробництва швидкорізальної сталі Р6М5

Таблиця 1.2 – Нормативи по встановленню кількості прутків

| Маса злитка | Кількість прутків при нормі розкислювання кг/т | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 9,1 | 7 | 9 | 11 | 14 | 17 | 17 | 23 | 26 |
| 11,4 | 7 | 11 | 14 | 18 | 21 | 25 | 29 | 32 |
| 12,5 | 8 | 12 | 16 | 20 | 23 | 27 | 31 | 35 |
| 20,0 | 19 | 19 | 25 | 31 | 38 | 44 | 50 | 56 |

Примітка: Питома вага : металу 78 т/м$^3$, 2,7 т/м$^3$. Маса одного погонного метру приблизно 0,2 кг.

### 1.3.2 Приварювання електродів до інверсної голівки

Інверсні голівки повинні відповідати формі електрода, до якого вони приварюються. Крім того, вони мають бути подібними за хімічним складом до електрода. Для виконання зварювання рекомендується застосовувати пластини завтовшки 15–40 мм і завдовжки 2–4 м, а також прутки квадратного або круглого перетину, які збираються ручним зварюванням у пластину. Прутки, що використовуються для формування пластини, повинні мати однаковий розмір та об’єм, причому ширина пластини повинна становити 60% поперечного перерізу електрода.

Для створення зварної зони дозволяється приварювати до торця електрода спеціальні скобки, виготовлені із прутків або спеціальних профільних кутників. Зварювання електрода до інверсної голівки виконується за допомогою апарата «А-550».

### 1.3.3 Захист поверхні електродів

Перед початком роботи сталевар ретельно перевіряє електроди. У разі потреби вони проходять через потужний прес на 1500 тонн для вирівнювання. Після вирівнювання електроди направляються на абразивний верстат (АМС), де з їхньої поверхні повністю видаляється окалина. Потім електроди переходять до етапу зачищення поверхні, який здійснюється на спеціальних верстатах: квадратні електроди обробляються на моделі SFXKP-630 виробництва компанії "ГенріхРау", смугові профілі— на верстаті моделі 2728ПС або наждаковому верстаті КЖ16Б61. Це дозволяє усунути окалину та незначні дефекти, такі як тріщини чи вм'ятини, що можуть бути присутні на поверхні електрода.

При обробці електродів без шлакових включень допускається зачистка глибиною не більше 10 мм та довжиною не більше 70 мм.

### 1.3.4 Підготовка печі

Перед початком складання печі сталевар ретельно оглядає та очищає піддон, поверхню і нижню частину кристалізатора (фланець), а також перевіряє

справність механічного та електричного обладнання печі. Після завершення підготовки приступають до складання печі, яке включає наступні етапи:

- встановлення затвора;

- укладання азбестового ущільнення;

- вимірювання довжини інверсних голівок від верхнього краю призми до верхнього торця електрода;

- монтаж електродів на голівку електродотримача;

- розміщення електродів з оптимальним зазором від стінок кристалізатора, затвора та піддона;

- встановлення кристалізатора на піддон через азбестове ущільнення;

- монтаж електричної перемички між кристалізатором і піддоном;

- установка сифонного обладнання для заливання флюсів.

Для забезпечення надійного електричного контакту між злитком і піддоном використовують задвірки з перетином орієнтовно 100х100 мм або меншого перетину, що відповідає гнізду піддона. Задвірки виготовляються зі сталей таких марок: 10ХСНД, 10ХНДМФ, 12ХГМД, 9Х2МФ, 20ХГСНМА, 16Г2АФ, 5ХНМ, 09Г2СД.

Електроди встановлюють симетрично щодо стінок кристалізатора. Монтаж електродів на голівку електродотримача здійснюється попарно для головної та донної частин злитка. Нижні торці електродів мають бути розташовані на однаковому рівні відносно піддона, причому максимальний допустимий перепад довжини електродів не має перевищувати 50 мм.

Стіни між кристалізатором і піддоном ущільнюють листовим азбестом. Оскільки листовий азбест не завжди забезпечує достатню герметичність, що може призводити до таких дефектів, як пробій струму, рекомендується для покращення герметичності кристалізатора підсипати по його краях прожарений флюс тієї ж марки, що й робочий. Вага флюсу не повинна перевищувати 5 кг. Після виконання всіх операцій сталевар ще раз уважно оглядає піч та запускає її в роботу.

### 1.3.5 Контроль й управління процесом ЕШП

Операції зі складання та розбирання печі виконуються в режимі ручного управління, використовуючи універсальні перемикачі «маршова подача» та «маршова подача кристалізатора», які розташовані на основному висувному пульті управління поперечною корекцією піддона і візка кристалізатора.

Під час процесу плавлення здійснюється контроль за наступними параметрами за допомогою персонального комп'ютера та пультів управління приладами:

- швидкість подачі електрода,
- величина опору в міжелектродному просторі,
- струм і напруга розбалансу.

Всі дані реєструються самописними пристроями. Положення електродів у кристалізаторі контролюється сталеваром як візуально, так і автоматично за допомогою комп'ютера.

Оперативний контроль швидкості плавлення та глибини занурення електродів у шлакову ванну здійснюється з використанням спеціального вимірювального пристрою. Цей пристрій включає вертикальну шкалу з поділками по 100 мм, нанесену на колону печі з боку, зручного для візуального спостереження. На шкалі закріплений покажчик зі стрілкою, який встановлений на візку електродотримача.

Шлак розташовується вздовж колони таким чином, що позначка «0» знаходиться на відстані 8,0 м від піддона печі У-436.

Процес електрошлакової плавки контролюється системою автономного регулювання (САР) за двома технологічними параметрами – опором міжелектродного простору (або електродними струмами) та швидкістю наплавлення, або одним із них. Регулювання цих параметрів здійснюється відповідно до заданої програми зміни функції часу. Управління здійснюється шляхом зміни вторинної напруги трансформатора печі через перемикання ступенів та регулювання глибини занурення електродів у шлак шляхом зміни швидкості їх руху.

### 1.3.6 Охолодження злитків

Після завершення роботи печі злитки залишають у кристалізаторі для охолодження. Тривалість охолодження злитків типів III, II та I розмірів становить 2,0-2,5 години, для злитків типу VII розміру цей час дорівнює 2,5-3,0 години. Передача злитків на термообробку має здійснюватися не раніше, ніж за одну годину після охолодження.

Усадка злитків під ковпаками сповільненого охолодження повинна виконуватися протягом 12 або 24 годин після отримання першої партії злитків, залежно від умов. Тривалість процесу усадки під ковпаки не має перевищувати 15 хвилин. Максимальний час накопичення злитків перед термічною обробкою не може перевищувати 75 годин.

## 1.4 Підготовка матеріалів до процесу ЕШП

Виплавка здійснюється у стаціонарних кристалізаторах з урахуванням типів розмірів, наведених у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Типи розмірів кристалізатора й електродів

| Типи розмірів | електрод | кристалізатор |
|---|---|---|
| | орієнтовним перетином, мм | середній перетин орієнтовно, мм |
| III-1 | 142 х 880 | 650 х 1100 |
| III-2 | 153 х 900 | 650 х 1100 |
| II | 142 х 1120 | 650 х 1350 |
| I | 142 х 1230 | 650 х 1480 |
| УII | 190 х 1260 | 700 х 1490 |

Примітка: Радіус закруглення кутів гільзи кристалізатора в 90 чи 200 мм.

Для зменшення кількості дефектів під час переплавлення використовують зневоднене негусте мастило, яке рівномірно наноситься тонким шаром на поверхню кристалізатора. Це дозволяє усунути дефекти типу «бульбашок», що виникають через нерівності кристалізатора. Для захисту поверхні електрода від окислення рекомендується покривати його алюмінієвою пастою.

### 1.4.1 Фізико-хімічні основи виплавки електродів марки Р6М5

Для отримання високоякісної сталі її необхідно виплавляти у вигляді електродів традиційним методом. Електроди марки Р6М5 виготовляють у дугових сталеплавильних печах. Процес виплавлення сталі включає такі основні етапи: розплавлення металу, усунення шкідливих домішок і газів, розкислення металу, а також заливання його з печі в ківш для подальшого розливання у виливниці або на машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ).

Заправку здійснюють спеціальною заправною машиною, яка подає заправні матеріали через насадку під дією стисненого повітря. Інший спосіб передбачає направлення цих матеріалів на поверхню печі з використанням швидко обертового диска, що опускається зверху в піч.

Для оптимального використання простору всередині печі укладання матеріалів виконується за правилами. У центральну частину печі поблизу електродів завантажують найбільші шматки (приблизно 40% від загального об’єму), до стінок розташовують середній брухт (45%), а дрібні шматки металу (15%) укладають ближче до основи та зверху завантаження. Дрібні складові заповнюють проміжки між великими шматками для забезпечення рівномірного нагрівання.

У процесі використання основних печей для десульфурації металу застосовується вапно. Для дефосфорації використовують шлак із високим вмістом CaO (до 50%), де саме вапно служить основним шлакоутворюючим компонентом. Його допускається замінювати вапняком, однак це може призвести до збільшення витрат електроенергії, необхідної для розкладання матеріалу:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \qquad (1.9)$$

Для виробництва 1 кг вапна витрачається 1 кВт·год електроенергії. Основним розріджувачем шлаків виступає плавиковий шпат, який поділяється на п’ять сортів залежно від вмісту $CaF_2$: у першому сорті він становить 92%, а в третьому – 65%. Ця речовина має низьку температуру плавлення і утворює

легкоплавкі евтектики з $CaSiO_2$, $Ca_2SiO_4$, а також з CaO і $Al_2O_3$. У системі з $CaCO_3$ і $CaF_2$ шлак набуває рідкотекучих властивостей за умови вмісту 30% $CaF_2$.

Окрім плавикового шпату, використовують також шамот, зокрема бій шамотної цегли чи відходи футерування ковшів. Шамот можна замінити випаленим каоліном, до складу якого зазвичай входить 38% $Al_2O_3$, 57% $SiO_2$ та 2% FeO. Додавання шамоту сприяє підвищенню стійкості отриманих матеріалів.

У процесі рафінування для розкислення застосовують металевий кремній у кількості 8–10 кг/т або порошковий алюміній – 5–7 кг/т для додавання у шлак, а також близько 2,5 кг/т вводять у ківш.

### 1.4.2 Вибір флюсу

Шлаковий шар є важливим елементом електричного ланцюга між трансформатором і піччю, що характеризується найбільшим опором, завдяки чому відбувається перетворення електричної енергії на теплову.

Шлак відіграє ключову роль у регулюванні хімічного складу металу. Окрім цього, у процесі електрошлакового переплаву (ЕШП) шлак виконує низку додаткових функцій, зокрема очищення металу від неметалевих включень і газів, а також захист рідкого металу від впливу зовнішнього середовища.

З цієї причини для переплаву застосовують високоякісний шлак (флюс) марок АНФ-6, АНФ-6-1, АНФ-6-2, АНФ-6-3, АНФ-1 (відповідно до ТУ 14-1-1948-77) та АНФ-32 (за ТУ 1-1184-75), хімічний склад яких наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Хімічний склад флюсів (шлаку)

| Марка флюсу | $CaF_2$ | $Al_2O_3$ | $CaO_2$ | SiO | C | FeO | S | P | $TiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Не менше | | | | | | |
| АНФ-6 | Осн. | 25,0-31,0 | 8,0 | 2,5 | 0,10 | 0,5 | 0,5 | 0,02 | 0,05 |
| АНФ-6-1 | Осн. | 25,0-31,0 | 8,0 | 2,5 | 0,05 | 0,5 | 0,5 | 0,02 | 0,05 |
| АНФ-6-2 | Осн. | 25,0-31,0 | 8,0 | 1,0 | 0,10 | 0,5 | 0,5 | 0,02 | 0,05 |
| АНФ-6-3 | Осн. | 25,0-31,0 | 8,0 | 1,0 | 0,05 | 0,5 | 0,5 | 0,02 | 0,05 |
| НФ-1 | 90,0 | 3,0 | 5,0 | 2,5 | 0,10 | 0,5 | 0,5 | 0,02 | 0,05 |
| АНФ-31 | 34 | 24,0-30,0 | 20-27 | 5-9 | 0,10 | 0,5 | 0,6 | 0,03 | 0,3-1,0 |

Для досягнення необхідного хімічного складу металу в печі допускається змішування кількох партій однієї марки. Щоб отримати сталь без пористості та крихкості, флюс слід витримувати при температурі 1650–1750 °С протягом 10 хвилин. Чим вищий парціальний тиск кисню у флюсі, тим більшим стає вміст кисню в металі.

### 1.4.3 Плавлення флюсів у флюсо-плавильній печі

Шлак, який надходить у цех, спочатку спрямовується до дробарки, де його подрібнюють до фракцій розміром 5–15 мм. Через значний рівень вологості шлаку, наявної у флюсах марок АНФ-6, АНФ-6-1, АНФ-6-2, АНФ-6-3 та АНФ-1 (вільна волога – 0,04%, зв'язана – 0,36%), існує велика ймовірність переходу газів та пари зі шлаку в метал під час переплавлення. Для зменшення дефектів, пов'язаних із використанням такого флюсу, необхідне його прокалювання в печі за температури 800–1200 °С протягом 4–6 годин. У результаті рівень вологи знижується з 20–70 см²/100 г до 4–5 см²/100 г для флюсу АНФ-6 і до 2–3 см²/100 г для АНФ-1.

Після прокалювання флюс охолоджують і направляють на розплавлення у флюсоплавильну піч типу У-360М. Важливо зазначити, що термін зберігання прокаленого флюсу не перевищує двох діб з моменту його термічної обробки.

Процес плавлення здійснюється із застосуванням графітових електродів діаметром 300–350 мм. Розплав ведуть за одноелектродною схемою протягом 10–30 хвилин за температури 1320–1340 °С, після чого напруга в мережі поступово підвищується, забезпечуючи потужність електрода на рівні 5–13 кА. Температура плавлення піднімається до 1650–1750 °С. Після завершення плавлення піч вимикають, а отриманий флюс витримують у тиглі-ковші 10–15 хвилин за температури 1650–1750 °С. Потім він транспортується до електрошлакової печі типу У-436 та через сифон заливається у кристалізатор. Унаслідок переплавлення змінюються фізико-хімічні характеристики флюсу. Наприклад, електричний опір флюсу АНФ-6 при нагріванні до 2000 °С збільшується із 1,75 Ом·см$^{-1}$ до 4,0 Ом·см$^{-1}$.

Для футерування тиглів-ковшів і внутрішньої поверхні флюсоплавильної печі У-360М використовуються такі матеріали:

- графітові балки згідно ТУ48-20-86-76;
- азбестовий лист за ГОСТ 2858–82;
- рідке скло;
- графітовий порошок за ГОСТ 5279–74;
- шамотна цегла пряма Ш-5 (ГОСТ 8691–73);
- шамотна цегла клиноподібна Ш-44 (ГОСТ 8691–73).

Після ремонту тиглі-ковші необхідно просушити у відпальних печах протягом 10 годин за температури 800 °С. Допускається також сушіння у ковпаках за температури 500 °С. Після цього проводять промивання ковша шляхом розплавлення приблизно 450 кг флюсу.

Кількість розплавленого флюсу залежить від типу кристалізатора:

- для кристалізатора типу I – 550 кг;
- для кристалізатора типу II – 650 кг;
- для кристалізатора типу III – 700 кг.

### 1.4.4 Самоплавкий екзотермічний флюс

Для підвищення якості сталі під час «сухого старту» (коли флюс розплавлюють не у флюсо-плавильній печі, а безпосередньо в печі електрошлакового переплаву, ЕШП), шлакову ванну формують за допомогою самоплавких екзотермічних сумішей С-1 і С-2.

Екзотермічна суміш С-1 складається з 16,5% алюмінієво-магнезитового порошку ПАМ-3 або ПАМ-4, 17% натрієвої селітри та 66,5% флюсу АНФ-1 чи АНФ-2. Кількість суміші, необхідної для запуску процесу, становить приблизно 1% від загальної маси шлакової ванни.

### 1.4.5 Повторне використання флюсів

Повторне використання ЕШП відпрацьованого шлаку АНФ-6, а також процеси зберігання та збирання флюсів здійснюються за такими групами:

I група – після електрошлакового переплаву (ЕШП), легованих сталей з вмістом титану.

II група – після ЕШП, матеріалів для підшипникових та конструкційних сталей.

III група – після ЕШП сталей типу АК.

Відпрацьований шлак дробиться до фракції розміром 15 мм за допомогою дробильних машин.

Для перевірки якості шлаку з кожної третьої партії флюсу відбирають зразки, щоб визначити вміст таких компонентів, як кремнезем, глинозем, кальцій, оксиди заліза, діоксид титану та фторид кальцію.

Відпрацьований флюс першої групи може бути використаний у виробництві нержавіючих сталей, якщо частка кремнезему у суміші свіжого і відпрацьованого флюсу не перевищує 5,0%.

Шлак можна не прокалювати за умови його використання протягом не більше 15 діб після збору.

# 2 КОНСТРУКЦІЙНА ЧАСТИНА

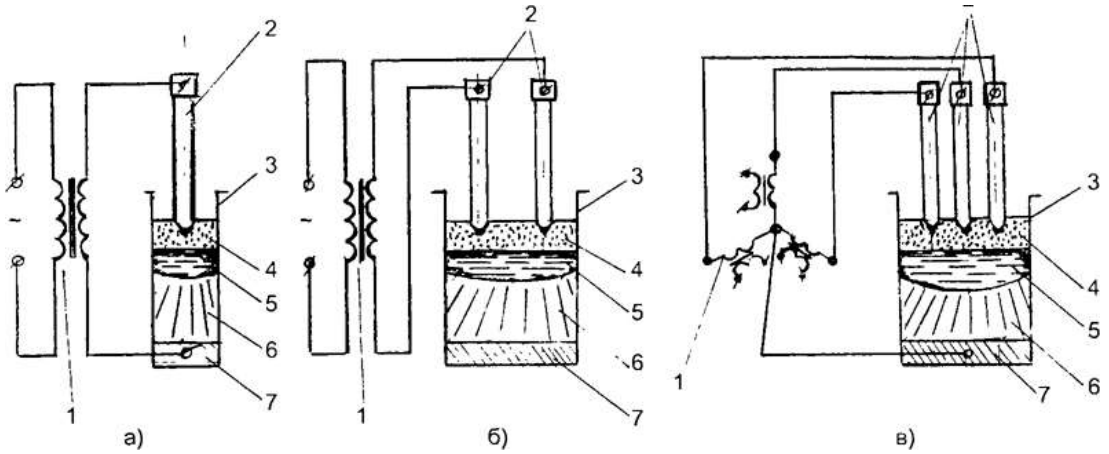
## 2.1 Визначення конструкції основних агрегатів

Існує кілька способів отримання зливків за допомогою електрошлакового переплаву. Основні схеми живлення печей електрошлакового переплаву зображені на рисунку 2.1. Найбільш популярною є двоелектродна біфілярна схема, яка дозволяє покращити техніко-економічні характеристики процесу та знижує споживання енергії.

Особливість даного методу полягає у використанні двох електродів однакового перерізу та розміру, які переплавляються одночасно в один кристалізатор. Це сприяє отриманню зливків значного об'єму та маси.

У процесі виробництва сталі за двоелектродною біфілярною схемою електроди з'єднуються послідовно та вводяться у шлакову ванну з однаковою швидкістю, що дозволяє знизити індуктивний опір електромережі агрегату.

Для впровадження методу електрошлакового переплаву за двоелектродною біфілярною схемою в цеху буде встановлено печі ЕШП У-436.




а - одноелектродні печі з одним електродом, що витрачається; б - двохелектродні однофазні печі з двома електродами (біфілярна схема); в - трифазні печі з трьома електродами, що витрачаються; 1 - електропічний трансформатор (в «в» - три однофазних трансформатора ); 2 - споживаний електрод (електроди); 3 - кристалізатор; 4 - рідка шлакова ванна; 5 - рідка металева ванна; 6 - злиток; 7 - піддон

Рисунок 2.1 – Принципові схеми живлення печей електрошлакового переплаву

## 2.2 Опис печі У-436

Однофазна електропіч У-436 (зображена на рисунку 2.2) призначена для електрошлакової виплавки листових злитків масою до 13 тонн шляхом переплавлення двох витратних електродів у єдиний кристалізатор. Цей процес здійснюється за біфілярною схемою, при якій електричний струм проходить від одного електрода до іншого, що відрізняється від традиційної схеми "піддон-електрод".

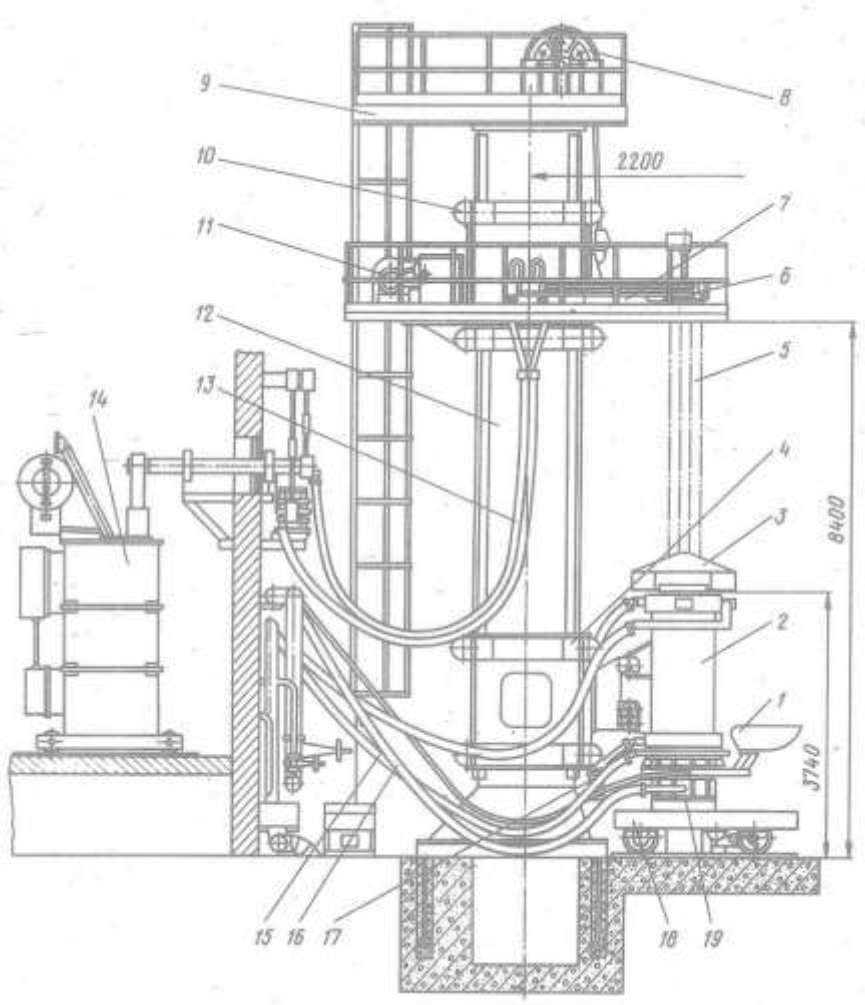



Рисунок 2.2 – Піч ЕШП У-436

Вибір біфілярної системи обумовлений низкою переваг. Передусім, така схема сприяє досягненню вищих техніко-економічних показників процесу електрошлакового переплавлення. Крім того, двоелектродна конфігурація є

особливо зручною для виготовлення злитків прямокутного перерізу, забезпечуючи високу якість виробленої сталі.

Піч живиться від однофазного трансформатора ЕОЦН-8200/10, який на виході забезпечує напругу в діапазоні від 78 до 127 В. Трансформатор має 17 ступенів регулювання напруги, які можуть перемикатися під час навантаження. Це дає змогу виконувати переплавлення за струму до 35 кА.

Піч У-436 була розроблена Інститутом електрозварювання імені Патона. Основними елементами та механізмами печі (рис. 2.2) є: порожниста колона 12, закріплена на фундаменті; верхня каретка 10, оснащена електродотримачем 7 і пристроєм 6 для закріплення електродів і подачі струму; механізм переміщення електрода 11 із системою управління 8; нижня каретка 4; кристалізатор 2 з піддоном 19 і сифоновим пристроєм 1, який забезпечує заливку розплавленого шлаку. Для забезпечення переміщення передбачено самохідний візок 18.

Обидва візки пересуваються уздовж колони за допомогою роликів, встановлених з чотирьох сторін. Верхній візок 10 призначений для переміщення електродів під час їх установки в процесі плавки. Струм від однофазного пічного трансформатора 14 подається через шини, гнучкий кабель 13 і мідні водоохолоджувальні трубки, розташовані на верхньому візку, до пристрою для утримання електродів. Цей пристрій змонтований на електродотримачі та оснащений мідними башмаками з похилою поверхнею, які взаємодіють із рамками, заздалегідь закріпленими на електродах 5. Конструкція струмопроводу разом із опорними рамками забезпечує надійне утримання важких електродів та гарантує якісний електричний контакт.

Нижній візок (візок кристалізатора) 4 використовується для утримання кристалізатора в процесі плавки та для видалення виливниці після формування зливка. Для виконання цих операцій він обладнаний лампами, а кристалізатор — спеціальними цапфами.

Кристалізатор має збірну конструкцію, що включає в себе мідний кокіль та кожух із немагнітної сталі. Кокіль має конструкцію з розширенням вниз, що полегшує зняття кристалізатора зі злитка. Як кристалізатор, так і мідний піддон є водоохолоджуваними; подача і відведення води здійснюється за допомогою

гумових шлангів 15. Для видалення виливниці використовується гідроциліндр 17, а її зняття зі злитка виконується верхнім візком із використанням ланцюгів. Масло для гідроциліндра подається через станцію подачі 16.

При виконанні спеціальних процесів плавки до кристалізатора може подаватися інертний газ через газорозподільну коробку 3, яка має невеликий отвір, розташований у верхній частині кристалізатора. Для додавання матеріальних компонентів у процесі плавки використовується дозатор секційного типу.

Самохідний візок моделі 18 призначений для транспортування збірного кристалізатора до печі, а також для відкатки злитка, що вже виплавлений, разом із кристалізатором до ремонтної зони під сферу дії мостових кранів. Під час плавлення візок виконує функцію опори для кристалізатора.

Видалення газів, які утворюються під час плавлення, забезпечується завдяки газовідсмоктувальній системі, обладнаній спеціальним пристроєм, розміщеним у кристалізаторі. Для обслуговування цього обладнання використовуються огороджені майданчики, встановлені на колоні та електродній каретці.

Кристалізатор є одним із ключових елементів конструкції печі ЕШП У-436, значною мірою відповідаючи за якість поверхні злитка, оптимальні умови кристалізації металу, величину головної та донної прорізей, а також за ефективність та економічність роботи печі. Крім свого основного завдання — формування злитка та кристалізації металу — кристалізатор додатково функціонує як плавильна камера. Усередині нього розташований перегрітий високоактивний шлак, температура якого може досягати 2000 °С. Висока теплова потужність, що виникає у шлаку під дією електричного струму, разом із великими струмами, які можуть досягати десятків тисяч ампер, створюють екстремальні теплові умови експлуатації кристалізатора. Тому однією з основних вимог до його конструкції є ефективне відведення тепла.

У печах типу У-436 зазвичай використовуються кристалізатори, висота яких враховує оптимальне розташування шлакової ванни та частини, що формує злиток. Оскільки рівень шлакової та металевої ванн у ковзних кристалізаторах залишається практично незмінним щодо стінок пристрою, це дозволяє впливати

на процеси в шлаковій та металевій ваннах для покращення продуктивності та якості рафінування.

Для печей У-436 найкращим рішенням є використання кристалізатора із системою зрошувального охолодження. Це значно підвищить тривалість експлуатації кристалізатора та допоможе мінімізувати витрати.

Зазвичай кристалізатори виготовляються з червоної міді марок М1-М3 відповідно до стандарту ГОСТ 859-78. Рідше для цієї цілі використовується хромиста бронза марки БрХ0,8 (ГОСТ 493-79), а іноді — сталь. Електрошлаковий процес з водоохолоджуваним кристалізатором має низку переваг, серед яких висока механічна міцність металу, низький рівень газових домішок і мінімальна кількість неметалевих включень. У результаті переплавки кількість неметалевих включень у металі зменшується в 2-3 рази, великі включення розміром понад 15-20 мкм повністю видаляються. Вміст азоту у металі скорочується на 30-35%, кисню — у 2-3 рази, а сірки — на 20%. Переплавлений метал вирізняється високою в'язкістю та пластичністю в широкому діапазоні температур, посиленою втомною міцністю і високою ізотропністю механічних властивостей.

Піддон для кристалізатора закріплюється в його нижній частині, таким чином закриваючи плавальний простір, що утворюється всередині кристалізатора. Цей піддон служить основою, на якій розпочинається процес виплавлення злитка. Форма піддону зазвичай відповідає геометрії зливків: він може бути круглим, квадратним або прямокутним.

Робоча плита виконує функцію утримання теплового та електричного навантаження піддону. Її форма може варіюватися — бути плоскою, увігнутою чи опуклою, що забезпечує можливість роботи із різними конфігураціями електрошлакових злитків. Для виготовлення робочої плити найчастіше використовують листову мідь або хромисту бронзу марок БрХ0,8 та БрХ1. У випадку сифонного заливання шлаку на поверхні плити створюють спеціальний паз для відведення шлакових мас.

Завдяки спрямованій кристалізації у водоохолоджуваному кристалізаторі, хімічній обробці активними шлаками та затвердінню в жужільному гарнисажі, отримані злитки демонструють високу однорідність структури, щільність,

мінімальний рівень неметалічних включень і шкідливих домішок. Їх гладка поверхня робить непотрібною додаткову механічну обробку. Щоб забезпечити отримання високоякісних злитків, особливу увагу приділяють конструкції ЕШП і піддону, який є ключовим елементом для формування злитка. Наразі проводяться роботи з розробки перспективних типів піддонів.

Електродотримач виконує функцію затиску витратного електрода та забезпечення подачі електричного струму до нього. Зазвичай затиски оснащуються інертними головками із вуглецевої сталі, до яких електроди прикріплюються методом зварювання. Для стабільного затиску електродів на печах моделі У-436 застосовуються пружинно-пневматичні механізми закріплення.

Технічна характеристика печі У-436:

Найбільший перетин злитка ……1460х640мм.

Найбільший перетин електрода…….1230х140мм.

Струм……..…35000 А.

Напруга…….50-150 В.

Продуктивність печі……0,3-1,5т/год

Швидкість переміщення електрода, мм/хв:

Робоча ……..……8-80

Маршова……..…….1,5

Швидкість переміщення візка……0,325 й 0,65 м/хв.

Механізм переміщення електродів:

Передаточне число черв’ячного редуктора……..31

Передаточне число комбінованого редуктора……..1975,7

Робочий електродвигун

Потужність…….3,2 кВт

Частота оборотів…….……1500 об/хв.

Маршовий електродвигун

Потужність……14 кВт

Частота оборотів…….....…….1460 об/хв.

Електроди: 1-випадок: перетин 970 х 200 довжина 5600

2-випадок: перетин 870 х 370 довжина 7500

2.3 Визначення кількості печей

Встановлюємо продуктивність однієї печі У-436:

$$Kn = \frac{Qзл}{\text{Т}пл + \text{Т}пр} \qquad (2.1)$$

де, $Qзл$ - маса злитку, тонн

Т$пл$ – тривалість плавлення (8,0 годин)

Т$пр$ - тривалість простоїв (20 хвилин = 0,3год)

$$Kn = \frac{12}{8 + 0.3} = 1.44 \text{ т/год.}$$

Після встановлюємо, середню масову швидкість плавлення, згідно формулі:

$$Gcp = \frac{Qсл}{Tпл} \qquad (2.2)$$

$$Gcp = \frac{12}{8} = 1{,}5 \text{ т/ год.}$$

де , $Qзл$ - маса злитку, тонн

Т$пл$ – тривалість правління (8,0 годин )

Встановлюємо продуктивність однієї печі на добу:

$$П_{діб} = 24 \times Gcp \qquad (2.3)$$

Де, 24 – кількість годин на добу.

$$П_{діб} = 24 \times 1{,}5 = 36 \text{ тонн на добу}$$

Тепер визначаємо кількість днів на рік, при якому працює піч

$$K = T_K - T_K^P \quad (2.4)$$

Де, $T_K$ - Кількість календарних днів на рік

$T_K^P$ - Кількість днів на рік, коли зупиняється піч ЕШП на плановий профілактичний ремонт.

$$\text{К} = 365 - 52 = 313 \text{ д}$$

Після обчислюємо річну продуктивність печі ЕШП:

$$\text{П}_{\text{ЕШП}}^{\text{Рік}} = \text{П}_{\text{діб}} \times \text{К} \quad (2.5)$$

$$\text{П}_{\text{ЕШП}}^{\text{Рік}} = 36 \times 313 = 11268 \text{ т}$$

При заданій продуктивності цеху, кількість устаткування сталеплавильних печей ЕШП визначається по формулі:

$$Нк = \frac{П_{Цеху}^{Г}}{П_{ЕШП}^{Г}} \quad (2.6)$$

Де, $П_{Цеху}^{Г}$ - річна продуктивність цеху, яка потрібно згідно завдання, тонн/рік;

$П_{ЕШП}^{Г}$ - річна продуктивність однієї печі ЕШП, тонн/рік;

*Нк* – необхідна кількість печей, шт.;

$$Нк = \frac{60000}{11268} = 5{,}32$$

Таким чином, за розрахунками, у цеху передбачається використання шести печей ЕШП У-436, з урахуванням необхідності додаткової печі на випадок планового ремонту обладнання. Для їх обслуговування заплановано чотири печі У-360М, а також чотири тигель-ковші типу У-503. Використання більшої

кількості таких агрегатів у проектованому цеху вважається недоцільним, оскільки цього обладнання достатньо для забезпечення роботи печей ЕШП. Приготування рідкого флюсу займає менш ніж годину, тоді як час плавлення в печі ЕШП досягає восьми годин.

## 2.4 Флюсо-плавильна піч У-360М

В електросталеплавильних цехах з установками електрошлакового переплаву (ЕШП) процес отримання рідких шлаків (флюсів) здійснюється під ретельним контролем, часто із застосуванням флюсоплавильних печей. Плавлення флюсів є відносно простою технологічною операцією, яку доцільно виконувати в установках типу У-360М. У цій печі струм підводиться за однофазною схемою, а діє вона за принципом, схожим на роботу дугових сталеплавильних печей (ДСП), де електрична дуга забезпечує розплавлення флюсу.

Установки У-360М дозволяють виробляти до 1000 кг рідкого флюсу, чого достатньо для потреб печі ЕШП типу У-436. Завантаження флюсу в тигель-ківш здійснюється за допомогою спеціального дозатора. Крім того, піч оснащена сучасною системою газоочистки, здатною усувати до 3000 м³ газів щороку.

Після повного розплавлення завантаженого об’єму флюсу (200–1000 кг), матеріал нагрівається до температури 2000°С, після чого витримується на цьому рівні протягом 35–40 хвилин. Далі розплавлений флюс транспортується у піч ЕШП за допомогою тигель-ковша У-503 і мостових кранів.

Тигель-ківш У-503 обладнаний електричним приводом для нахилу і має робочу місткість від 200 до 1000 кг рідкого флюсу, що дозволяє ефективно організувати процеси транспортування і переробки матеріалу.

Технічна характеристика У-360М:

Одноелектродна , однофазна

Маса розплавленого шлаку…….…….. 200 - 1000 кг.

Потужність струму плавки …….15,0 кА

Робоча напруга…….……41-93В

Розміри електродів, мм:

Діаметр ……250-300

Довжина…….3000

Швидкість вертикального переміщення електроду, м/хв.:

У робочому варіанті ……0,5

При наладці……..1,5

Механізм переміщення тигель-ковша електричний

Габарити ( без трансформатору й пульта управління)

Ширина печі …….……..3200 мм

Довжина печі…….……..3700 мм

Висота……..…….13,458 мм

Розміри ковша

У плані ……...……..…1750х2125мм

По висоті ……..……..2390мм

# 3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

У сучасних сталеплавильних цехах, де зазвичай виробляють сталі для відповідальних конструкцій і застосувань, доводиться працювати зі шлаками, оптимізованими для глибокої десульфурації, розкислення сталі та очищення її від неметалевих включень. Ці шлаки, як правило, включають вапняно-глиноземисті синтетичні композиції, які використовуються для ковшової (позапічної) обробки металу; шлаки, що утворюються внаслідок горіння екзотермічних сумішей чи плавлення теплоізоляційних складів у виливницях на поверхні рідкого металу, а також шлаки електрошлакового переплаву. Ефективність таких композицій визначається не лише їх хімічним складом, а й показниками в'язкості.

Параметри в'язкості шлаків, які взаємодіють з металевою фазою всередині металургійного агрегату, відіграють критичну роль у фізико-хімічних процесах, що відбуваються в ньому. Особливе значення має вплив в'язкості на швидкість перебігу багатьох ключових реакцій. Це пояснюється тим, що стадії таких процесів, як десульфурація, зневуглецювання, засвоєння легуючих елементів чи розкислення сталі, часто обмежуються швидкістю дифузії та іншими механізмами масопереносу. Взаємозв’язок між параметрами в’язкості та дифузії підтверджує формула Стокса-Ейнштейна, яка в загальному наближенні демонструє залежність коефіцієнта дифузії D від коефіцієнта динамічної в'язкості η частинки та її радіусу r:

$$D = \frac{\mathrm{RT}}{N_A} \cdot \frac{1}{6\pi\eta r} \tag{3.1}$$

В'язкість суттєво впливає на швидкість підйому неметалевих включень у сталі, які негативно позначаються на її механічних властивостях. Цей вплив можна проаналізувати за допомогою формули Стокса, доповненої поправкою Адомара-Рибчинського у випадку, якщо неметалеве включення знаходиться у рідкому стані.

$$V = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot g \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\eta_1} \cdot \frac{3\eta_1 + 3\eta_2}{2\eta_1 + 3\eta_2}, \tag{3.2}$$

де $\rho_1$ та $\rho_2$ - щільності металу та шлаку відповідно; $\eta_1$ і $\eta_2$ - в'язкості металу та шлаку відповідно; r – радіус частки.

Газопроникність металургійних шлаків значною мірою визначається їхньою в'язкістю. Отже, формування в'язкого шлаку як у ковші-сталевозі, так і у проміжному ковші МБЛЗ сприяє зниженню забруднення металу газами, які негативно впливають на його механічні властивості, зокрема на вміст азоту. Цей вплив можна розрахувати за допомогою кінетичного рівняння:

$$\frac{d[N]}{d\tau} = \beta \cdot ((N)_{\text{пов}} - (N)_{\text{гр}}) \cdot S, \qquad (3.3)$$

де [N] - вміст азоту в металі; $(N)_{\text{пов}}$ - вміст азоту на поверхні розділу шлак-газ; $(N)_{\text{гр.}}$ - вміст азоту на межі поділу шлак-сталь; S – площа поверхні взаємодії фаз; $\tau$ – час; $\beta$ – коефіцієнт масопередачі азоту через шлак до металу. Причому, $\beta \simeq \frac{1}{\eta}$.

Наведення в'язкого шлаку в ковші-сталевозі, а також у проміжному ковші МБЛЗ сприяє зменшенню охолодження металу в ковші. Це пов'язано з утворенням додаткового теплового опору, який уповільнює передачу тепла від поверхні металу до навколишнього середовища.

## 3.1 Теоретичні засади в'язкості металургійних розплавів

### 3.1.1 Загальна характеристика явища в'язкості

Під час руху рідини або газу швидші шари захоплюють за собою ті, що рухаються повільніше. В результаті цього швидкість перших зменшується, а других — збільшується, тобто відбувається вирівнювання швидкостей між шарами. Це явище називають внутрішнім тертям або в'язкістю. Воно, як і дифузія чи теплопровідність, зумовлене тепловим рухом молекул, який дає можливість передавати швидкість від одного шару до іншого.

Потік імпульсу П, схожий на дифузійний потік, визначають як суму імпульсів молекул, що перетинають одиничну площину за одиницю часу. У такий спосіб:

$$П = -\eta \frac{dV}{dx}, \tag{3.4}$$

де $\frac{dV}{dx}$- градієнт швидкості течії; η-коефіцієнт динамічної в'язкості.

Розділимо обидві частини рівняння (3.4) на густину рідини ρ

$$\frac{П}{\rho} = -\nu \cdot \frac{dV}{dx}, \tag{3.5}$$

Так як потік П є зміною деякого сумарного імпульсу за 1 с, то $\frac{П}{\rho}$ характеризує швидкість вирівнювання швидкості потоку в одиниці об'єму.

Співвідношення $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ називається кінематичною в'язкістю. З механіки відомо, що зміна імпульсу за одиницю часу є силою, в даному випадку силу тертя. Ця сила діє щодо до напрямку руху рідини.

На межі між твердим тілом і рідиною виникають сили молекулярного притягання, які спричиняють закріплення тонкого шару рідини на поверхні твердого тіла, роблячи його нерухомим. Цей нерухомий шар, у свою чергу, уповільнює рух наступного шару рідини, і процес повторюється далі. Аналогічне явище може спостерігатися на межі між двома рідинами або на поверхні контакту між рідиною і газом.

### 3.1.2 В'язкість металургійних шлаків та її особливості

Особливістю металургійних шлаків є те, що вони являють собою оксидний розплав. Згідно з рентгеноструктурними дослідженнями твердих оксидів і силікатів, основні оксиди мають кристалічну ґратку типу NaCl. Основною структурною одиницею різних модифікацій $SiO_2$ є тетраедр, у центрі якого

розташований катіон кремнію, а по вершинах – чотири аніони кисню. Це свідчить про іонну природу кристалічних оксидів. Значна частка ковалентного зв’язку забезпечує високу стабільність кремнекисневих тетраедрів. Кристалічні силікати та силікатні стекла також мають іонну природу, причому заряди іонів кисню змінюються залежно від типу катіонів у їх оточенні.

Оскільки у багатокомпонентному розчині визначення точних зарядів іонів є складним завданням, на межі із металом обмін іонів електронами відбувається відповідно до їх валентностей. У зв’язку з цим для розгляду валентностей іонів у твердих і розплавлених силікатах використовують їх умовні значення, наприклад, $Ca^{2+}$, $O^{2-}$.

Ці дані припускають укласти, що рідкі шлаки є іонними розплавами, що складаються з одноатомних катіонів металів, що вносяться основними оксидами, аніонів кисню $O^{2-}$ і багатоатомних кремнієвих аніонів $Si_xO_y^{z-}$ різного ступеня складності: від найпростішого тетраедра $SiO_4^{4-}$ при малих концентраціях $SiO_2$ до ланцюжків великої протяжності та інших складних структур, що виходять полімеризацією тетраедрів при високих вмістах $SiO_2$.

Сірка буває у шлаках у формі одноатомного аніону, оточеного катіонами основних металів.

З збільшенням мольної частки $SiO_2$ збільшується частка громіздких багатоатомних кремнієвих аніонів $Si_xO_y^{z-}$ і збільшується в'язкість шлаку. Навпаки, якщо збільшуються мольні частки аніонів кисню і фтору, це призводить до розукрупнення багатоатомних кремнекисневих аніонів $Si_xO_y^{z-}$ та зниження в'язкості шлаку.

Зі збільшенням температури в'язкість шлаку швидко знижується. Зазвичай залежність в'язкості шлаку від температури описується рівнянням Френкеля:

$$\eta = A \cdot e^{\frac{E_\eta}{\mathrm{RT}}} \tag{3.6}$$

де

Е- Енергія активації в'язкої течії.

Іноді цю залежність представляють як:

$$\eta = A \cdot \mathrm{T} \cdot e^{\frac{E_\eta}{\mathrm{RT}}} \qquad (3.7)$$

Залежність в'язкості шлаку від температури є різною для кислих та основних шлаків. Як показано на рис. 3.1, основні шлаки утворюють кристалічні структури, і при їх охолодженні система переходить у гетерогенний стан, що призводить до різкого збільшення в'язкості. У свою чергу, кислі шлаки мають аморфну структуру. Під час зниження температури в них відбувається поступова полімеризація, внаслідок чого в'язкість шлаку змінюється плавно.

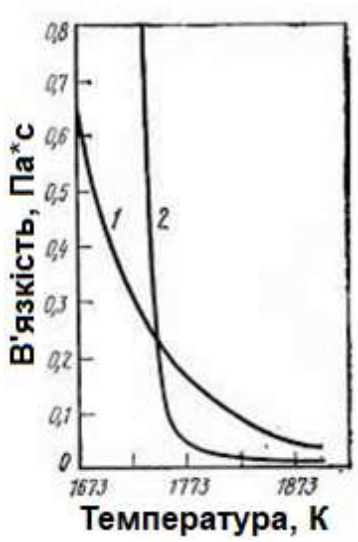



Рисунок 3.1 – Залежність в'язкості шлаку від температури неоднакова для кислих та основних шлаків

Плавлення і затвердіння багатофазної кристалічної системи, такої як шлак, відбувається поступово, що зумовлює зміни в’язкості в межах певного температурного діапазону. У фазі плавлення речовина являє собою суміш твердих і рідких фаз, причому тверда компонента зазвичай формує своєрідний скелет. У цей період в’язкість системи не можна однозначно визначити, а сама система набуває властивостей пластичності. Після того як остання кристалічна фаза розплавляється, в’язкість рідкої фази починає змінюватися за плавною кривою зі зростанням температури. Для типових стекол, до яких належать і багато різновидів шлаків, характерна значна варіативність в’язкості у широкому діапазоні температур. Зокрема, від так званої температури склування (Тр), при якій в’язкість складає приблизно 0,1 П·Па·с, до температури ліквідусу

відбувається поступова зміна цього параметра, при цьому на кривій $\eta = A \cdot e^{\frac{E_\eta}{RT}}$ ніяких аномалій не спостерігається. Відомо більше 20 характерних точок на цій кривій, що мають особливий теоретичний або прикладний інтерес, зокрема за точку видимої плинності скла вважають величину близько 0,1 МПа • с.

Таким чином, при додаванні основних оксидів у кислий шлак виникає зниження в'язкості. При подальшому додаванні основного оксиду в'язкість шлаку починає зростати. Також в'язкість шлаку зростає при додаванні до нього понад 10% MgO. Розріджувачами шлаку зазвичай слугують $CaF_2$, $Al_2O_3$. Діаграма в'язкості шлаків системи $CaO\text{-}SiO_2\text{-}FeO$ (а) та $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$ (б) наведена на рис. 3.2.

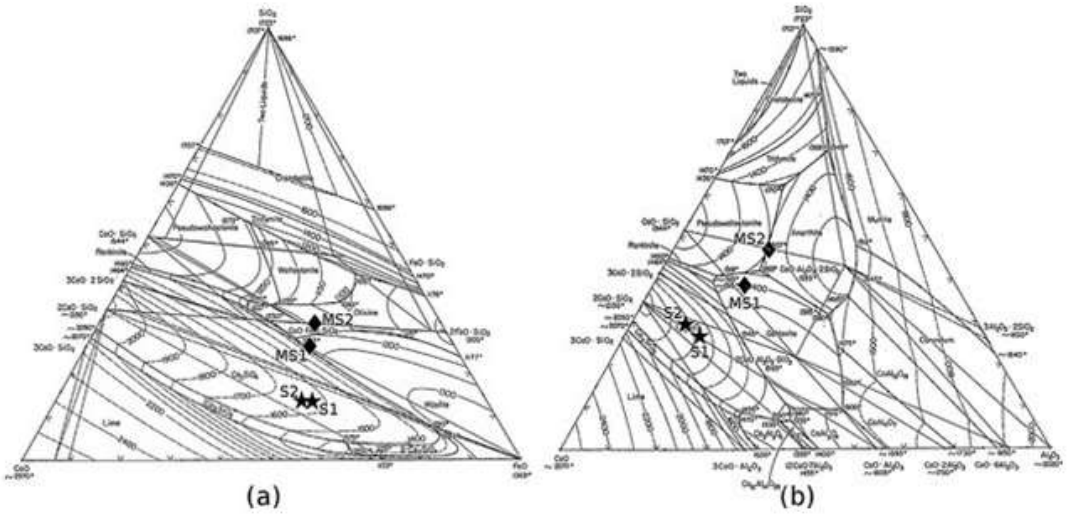



Рисунок 3.2 – Діаграма в'язкості шлаків системи

$CaO\text{-}SiO_2\text{-}FeO$ (а) та $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2$ (б)

## 3.2 Моделі для прогнозування фізико-хімічних та технологічних властивостей металургійних розплавів

### 3.2.1 Емпіричні моделі в'язкості рідких шлаків

Моделі в'язкості шлаків можна класифікувати на три основні групи:

1. Емпіричні або стохастичні моделі
2. Напівемпіричні моделі
3. Теоретичні моделі

Емпіричні моделі базуються на узагальненні експериментальних даних завдяки застосуванню методів математичної статистики, при цьому вони не враховують теоретичних основ. Зазвичай такі моделі встановлюють залежність між в'язкістю шлаку, його складом та температурою.

Напівемпіричні моделі спираються на експериментальні дані, які потім перетворюються на константи та постійні величини згідно із прийнятою теоретичною залежністю.

Модельні рівняння найчастіше будуються через представлення в'язкості як функціонального ряду Тейлора:

$$\eta = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \ldots \qquad (3.8);$$

де $x_i$ - мольна частка компонента в шлаку;

$b_0$, $b_i$, $b_{ij}$ - ці коефіцієнти знаходять шляхом обробки експериментальних даних в результаті регресійного аналізу.

Прикладом може бути наступна модель п'ятикомпонентного шлаку, наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Приклад шлакових систем

| Позначення | Оксид | Межі вмісту |
|---|---|---|
| X1 | $SiO_2$ | 30-45 |
| X2 | CaO | 19-50 |
| X3 | MgO | 0.5-15 |
| X4 | MnO | 1-25 |
| X5 | $Al_2O_3$ | 4-10 |

В'язкість кожного з цих 100 шлаків вимірювали за чотирьох різних температур. Для кожної температури було складено рівняння, за яким визначили емпіричні коефіцієнти. Зокрема, для температури 1500 °C ця залежність має такий вигляд:

$$\eta=-124,1+4,98X_1+2,39X_2-12,53X_3+1,34X_4+13,03X_5 \quad (3.9);$$

Для розливних шлаків, які утворюються зі шлакоутворювальних сумішей у кристалізаторі МБЛЗ, французький дослідник Рібо вивів напівемпіричну залежність, ґрунтуючись на таких припущеннях:

$$\eta = \text{АТехр}\left(\frac{B}{T}\right), \text{ де } B = \frac{E_\eta}{R} \quad (3.10);$$

Коефіцієнти А і В пов'язують зі складом шлаку і вишукують їх зв'язок зі складом шлаку:

$$\ln A = 19.81 - 35.75X_{Al_2O_3} + 1.73X_{CaO} + 5.82X_{CaF_2} + 7.02X_{Na_2O}, \text{ Па·с/К} \quad (3.11);$$

$$B = 31140 + 68833X_{Al_2O_3} - 23896X_{CaO} - 46351X_{CaF_2} - 39519X_{Na_2O}, \text{ К} \quad (3.12);$$

Точність цих формул, однак, невелика: ±1,5 Па·с.

Японські дослідники запропонували формулу:

$$\ln\eta = \ln A + \frac{B}{T} \quad (3.13);$$

$$\ln A=-0.242(Al_2O_3)-0.061(CaO)-0.121(MgO)+0.063(CaF_2)-0.19(Na_2O)-4.816 \quad (3.14);$$

$$B=-92,59(SiO_2)+283.186(Al_2O_3)-165.635(CaO)-413.646(CaF_2)-455.103(Li_2O) + 29012,564 \quad (3.15);$$

Ці коефіцієнти отримані на основі 483 шлаків з експериментальним формулюванням в'язкості.

Установлено, що коефіцієнт кореляції r=0.96 та цією моделлю.

У рідкому стані на сучасні погляди шлак - це іонний розплав силікатного типу. Зі збільшенням мольної частки кремнезему збільшується частка громіздких кремнекисневих аніонів і збільшується його в'язкість і навпаки, якщо

збільшується $X_{O^{2-}}$ і $X_{F^-}$. Це призводить до розукрупнення кремнекисневих комплексів і зниження в'язкості шлаку.

Було введено коефіцієнт структури аніонів КСА:

$$\text{КСА} = \frac{O^{2-}+F^-}{\text{Si}^{4+}+0.75\text{Al}^{3+}} \quad (3.16);$$

Далі було запропоновано зв'язати коефіцієнти А і В з КСА:

$$\lg\eta = \lg B + \frac{E_\eta}{\text{RT}} \quad (3.17);$$

$$\lg E_\eta = 0.104\text{КСА} + 2.455 \quad (3.18);$$

$$\lg B = 0.836\text{КСА} - 7.915 \quad (3.19);$$

Можливе інше використання КСА (прямий вплив на в'язкість):

$$\ln\eta = a\ln(\text{КСА}) + b \quad (3.20)$$

На основі цього було отримано дві формули, що дозволяють прогнозувати в'язкість шлаків:

$$\ln\eta = -6.723\ln(\text{КСА}) + 6.799 \text{ при t=1300°C} \quad (3.21);$$

$$\ln\eta = -6.161\ln(\text{КСА}) + 7{,}13 \text{ при t=1350°C} \quad (3.22).$$

### 3.2.2 Модель Е.В. Приходька

Існуючі теорії будови металургійних розплавів, а також методи розрахунку їхніх властивостей і результатів взаємодії характеризуються значною різноманітністю. Попри велику кількість проведених досліджень у цій галузі, проблема залишається недостатньо вивченою для того, щоб загальні фізико-хімічні принципи теорії рідкого стану могли бути повноцінно використані для прогнозування результатів технологічних процесів.

Основою підходу до вирішення цієї проблеми є теорія фізико-хімічного моделювання розплавів, запропонована Е. В. Приходьком. Ключовим

положенням цієї теорії є уявлення про змінюваність зарядового стану атомів кожного компонента як шлакових, так і металевих розплавів, що залежить від конкретного кристалохімічного оточення. У цьому контексті металургійні розплави трактуються як хімічно цілісні системи, зміни складу яких впливають на сукупність їхніх фізико-хімічних характеристик і реакційну здатність. Це відбувається за рахунок супутніх змін у параметрах структури системи та характеристиках міжатомної взаємодії.

Розроблено і впроваджено методику розрахунку та застосування нових критеріїв цих моделей, що суттєво розширило потенціал цієї методології та її практичне використання в різних напрямах теорії металургійних процесів.

Основними парціальними параметрами моделі залізовуглецевих розплавів є (табл.1) ефективні заряди компонентів ($Z_i$) обумовлені кожної пари реагентів ( $ZI_{i-j}$)і середньостатистичні значення ($ZI_{Cp}$), що характеризують зарядовий стан кожного з компонентів у розплаві.

Таблиця 3.2 – Склади металевих розплавів основних металургійних переділів

| | Хімсклад металу, % | | | | | | Інтегральні параметри та середні заряди $E_i$ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| № | C | Si | Mn | S | P | Fe | d | $Z^Y$ | $Z_c$ | $Z_{Si}$ | $Z_{Mn}$ | $Z_S$ | $Z_p$ | $Z_{Fe}$ |
| 1 | 4.56 | 0.79 | 0.21 | 0.019 | 0.050 | 94.22 | 2.34 | 1.41 | -2.745 | -1.089 | 0.319 | 0.166 | -0.444 | 0.281 |
| 2 | 4.56 | 2.20 | 0.20 | 0.024 | 0.056 | 92,78 | 2.33 | 1.44 | -2.732 | -1.073 | 0.337 | 0.180 | -0.428 | 0.298 |
| 3 | 4.85 | 0.64 | 0.22 | 0.010 | 0.048 | 94.22 | 2.32 | 1.41 | -2.717 | -1.057 | 0.352 | 0.195 | -0.413 | 0.313 |
| 4 | 4.85 | 0.65 | 0.22 | 0.009 | 0.047 | 94.21 | 2.32 | 1.41 | -2.717 | -1.057 | 0.352 | 0.195 | -0.413 | 0.313 |
| 5 | 0.09 | - | 0.07 | 0.021 | 0.009 | 99.71 | 2.81 | 1.15 | -3.459 | - | -0.54 | -0.59 | -1.236 | -0.541 |
| 6 | 0.20 | - | 0.19 | 0.025 | 0.008 | 99.49 | 2.79 | 1.16 | -3.431 | - | -0.51 | -0.56 | -1.206 | -0.509 |
| 7 | 1.45 | 2.40 | 90.6 | 0.030 | 0.310 | 5.11 | 2.68 | 1.50 | -3.199 | -1.585 | -0.18 | -0.27 | -0.913 | -0.193 |
| 8 | 1.30 | 2.30 | 90.3 | 0.030 | 0.300 | 5.67 | 2.70 | 1.50 | -3.226 | -1.616 | -0.21 | -0.30 | -0.942 | -0.224 |

Примітка: 1-4-чавуни; 5,6 – конвертерна сталь; 7,8 – феросплави.

Інтегральними характеристиками електронної структури розплаву як хімічно єдиної системи є її хімічний еквівалент ($Z^Y$), що підсумовує дані про заряди компонентів з урахуванням ймовірностей утворення зв’язків різного типу, та структурний параметр (d), що характеризує середньостатистичну відстань між атомами в квазіхімічному наближенні.

Базова модель структури шлакових розплавів була розроблена на кшталт моделей упорядкованих структур кристалічних і молекулярних сполук.

Основними параметрами моделі при приведенні розплаву до виду КрА, де ρ - показник стехіометрії, що визначається ставленням числа катіонів К (Fe, Cr, Al, Si, Mn ….) до аніонів А (O, S, F….) в 100г розплаву є: значення середньозважених зарядів і радіусів катіонів в підсистемі А, а також у напрямку зв'язку К-А та А-К, які розраховуються за формулами:

$$Z_{k(k-A)} = \sum_{i=1}^{n} M_{\text{ai}} \sum_{j=1}^{m} M_{\text{kj}} \cdot Z_{\text{Ki-ai}} \quad (3.23);$$

$$Z_{A(k-A)} = \sum_{i=1}^{n} M_{\text{ai}} \sum_{j=1}^{m} M_{\text{kj}} \cdot Z_{\text{ai-Ki}} \quad (3.24);$$

$$Z_{k(k-k)} = \sum_{i=1}^{n} M_{\text{ai}} \sum_{j=1}^{m} M_{\text{kj}} \cdot Z_{\text{Ki-Kj}} \quad (3.25);$$

$$Z_{A(A-A)} = \sum_{i=1}^{n} M_{\text{ai}} \sum_{j=1}^{m} M_{\text{kj}} \cdot Z_{\text{ai-aj}} \quad (3.26);$$

тут індекси К і А вказують на зв'язок катіону К і аніону А, m – кількість катіонів, n – кількість аніонів, $M_{ki}$ та $M_{ai}$ – відповідно їх атомні частки.

Інтегральними характеристиками розплавів є: показник стехіометрії ρ, параметр Δе, що характеризує взаємодію у зв'язку катіон-аніон, що обчислюється як:

$$\Delta e_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^{n} M_{\text{ai}} \sum_{j=1}^{m} M_{\text{kj}} \cdot \Delta e_{\text{Ki-ai}} \quad (3.27);$$

середньостатистична між'ядерна відстань d (табл. 3.2) та показник індивідуальності катіонної підграти розплаву $\text{tg}\alpha = \text{tg}\alpha_i \cdot M_i$(tgα – табульований для кожного елемента таблиці Менделєєва).

Аналіз показав, що використання зазначених параметрів стало надзвичайно ефективним інструментом для узагальнення інформації про склад багатокомпонентних оксидних розплавів, особливо в аспекті закономірностей формування їхніх властивостей. У результаті першого етапу досліджень були отримані рівняння, які дозволяють розраховувати в'язкість (η) за різних температур, поверхневий натяг (σ), електропровідність (к), щільність (d) та

температуру плавлення (Т) шлаків, що утворюються під час доменного процесу. Методи фізико-хімічного моделювання розплавів шлаків і металів успішно інтегровані в програмне забезпечення підсистем «Шлак» та «Метал».

Таблиця 3.3 – Склади шлаків, які відповідають складам металу табл. 3.2.

| Склад шлаку, % | | | | | | | | Модельні параметри | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| № | CaO | MgO | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | MnO | FeO | S | d | Δe | ρ |
| 1 | 41.09 | 10.17 | 41.55 | 6.23 | 0.15 | 0.30 | 1.00 | 2.891 | -2.604 | 0.707 |
| 2 | 41.87 | 9.71 | 40.68 | 6.44 | 0.14 | 0.27 | 0.81 | 2.897 | -2.596 | 0.707 |
| 3 | 49.28 | 4.52 | 13.51 | 0.99 | 2.50 | 20.99 | 0.13 | 3.161 | -2.750 | 0.858 |
| 4 | 51.26 | 4.63 | 16.63 | 0.59 | 2.66 | 16.74 | 0.14 | 3.082 | -2.596 | 0.838 |
| 5 | 45.79 | 5.96 | 19.56 | 1.23 | 5.17 | 14.27 | 0.11 | 3.134 | -2.829 | 0.815 |
| 6 | 25.10 | 2.80 | 27.90 | 2.20 | 41.67 | 0.20 | 0.10 | 3.506 | -4.228 | 0.769 |
| 7 | 3.60 | 48.91 | 31.97 | 0.15 | 9.55 | 5.15 | 0.66 | 3.500 | -3.914 | 0.792 |
| 8 | 2.68 | 46.21 | 32.59 | 0.348 | 9.79 | 7.78 | 0.59 | 3.500 | -3.979 | 0.785 |

Різниця хімічних потенціалів компонентів у шлаку та металі є ключовим фактором, який визначає повноту переходу речовини між фазами, а також суттєво впливає на швидкість цих процесів. Тому питання визначення хімічних потенціалів і відповідних активностей ($a_i$) компонентів займає важливе місце в теорії металургійних процесів.

У більшості випадків константи рівноваги для реакцій, що відбуваються на межі «метал-шлак», отримані експериментальним шляхом. Формули для їх обчислення залежать від модельних уявлень авторів щодо механізму взаємодії структурних частинок у розплавах. При невеликому вмісті домішок у розплавах заліза (до 6–10%), характерному для більшості марок сталі та чавуну, вважається, що активність заліза в металургійному розплаві дорівнює одиниці, тобто а [Fe] = 1. Для інших компонентів у металургійній практиці активно використовуються розрахункові методи визначення активностей.

Щодо шлаків, для опису їх властивостей і поведінки найчастіше застосовують модель регулярних іонних розчинів (РІР) В. А. Кожеурова, модель шлаку як фази з колективними електронами А. Г. Пономаренка (КЕ), а також полімерну модель.

У міру накопичення в базі «Шлак-Метал-Газ» даних про термодинамічні властивості шлакових та металевих розплавів було виконано аналіз існуючих підходів до прогнозування активностей компонентів у шлакових розплавах. На прикладі виконаного В.К. Новиковим із співавторами розрахунку активності оксиду марганцю в багатокомпонентних алюмосилікатних системах MnO-CaO-$SiO_2$, MnO-$Al_2O_3$-$SiO_2$, MnO-CaO-$SiO_2$-$Al_2O_3$, MnO-CaO-$SiO_2$-FeO-MgO проведений порівняльний аналіз активності MnO.

У ході аналізу вперше була встановлена необхідність обліку, поряд з інтегральними параметрами Δe та ρ, при вирішенні завдань такого рівня парціальних параметрів взаємодії – у даному випадку заряду марганцю $Z_{Mn}$.

Використання поєднання інтегральних та парціальних фізико-хімічних критеріїв дозволило об'єднати всі склади вищезгаданих систем у єдину вибірку та отримати модель для прогнозування активності MnO у шестикомпонентній системі MnO-CaO-$SiO_2$-FeO-MgO-$Al_2O_3$:

$$a_{\mathrm{MnO}} = -2.17395 - 0.1067\Delta e + 3.17369\rho + 0.18185Z_{(\mathrm{Mn})} \quad \text{R= 0.99 (3.28);}$$

де К – коефіцієнт кореляції.

З представлених у роботі результатів слід, що з порівняно невеликих вмістах $SiO_2$ і $Al_2O_3$ ($Al_2O_3$<10% і $SiO_2$<30%) всі чотири моделі задовільно описують експериментальні дані у всьому вивченому інтервалі складів. При переході до систем із високим вмістом $SiO_2$ та $Al_2O_3$ розрахунок активності за методом PIP та КЕ дає значні відхилення від досвіду.

Аналогічні результати отримані при порівняльному аналізі розрахунків активності Fe:

$$a_{\mathrm{FeO}} = -0.133 - 0.421\Delta e - 0.384\rho + 0.217Z_{(\mathrm{Fe})} \qquad \text{R=0.95} \qquad \text{(3.29);}$$

Таким чином, головна перевага згортки хімічного складу шлакового розплаву у вигляді модельних параметрів (Δe, ρ, $Z_{ср}^{Э}$), що відбивають його

структуру, полягає в тому, що їх використання дозволяє враховувати при оцінці активності компонентів їх хімічний (зарядний) стан та властивості середовища у вигляді ($a_i^{Э}$) = f(Δe, ρ, $Z_{шл}^{Э}$).

Як показали проведені дослідження, параметри Δe, ρ, $Z^Y$ досить точно описують активність компонентів у розплавах для рівноважних чи нейтральних умов.

У міру відхилень взаємодіючих систем від рівноваги зростає роль заряду елемента $Z_E$ і параметра перезарядки ($\Delta Z_E = Z_{E\ мет} - Z_{E\ шл.}$), який характеризує зміну електронного стану компонента при переході з однієї фази в іншу.

Так, при дослідженні накопичених у базах ретроспективних виробничих даних за показниками виплавки фосфористого та малофосфористого чавунів 25 металургійних підприємств світу встановлено суттєвий вплив зарядового стану на хімічну активність дифузного елемента. Як критерій рекомендується оперувати величиною перезарядки $\Delta Z_{E.}$

Таким чином, спільний вплив інтегральних (Δe, ρ, $Z^Y$) та парціальних ($\Delta Z_i$) параметрів структури забезпечує високу точність (R>0.9) прогнозних моделей типу:

$$a_{SiO_2} = 1.743 - 0.333\Delta e - 2.484\rho - 0.213Z^Y - 0.26Z_{Si} \quad (3.30);$$

$$\lg a_{Si} = 0.11Z^Y + 1.67\Delta e - 15.92\rho + 3.67\Delta Z_{Si} + 11.39 \quad (3.31);$$

$$\lg f_S = 0.53Z^Y + 0.35\Delta e - 4.76\rho + 0.82\Delta Z_S + 2.98 \quad (3.32);$$

Розрахунково-аналітичні дослідження засвідчили, що взаємодія в системі Метал-Шлак спричиняє зміну активності компонентів як шлаку, так і металу. Цей результат узгоджується з визначенням процесів взаємодії розплавів як кооперативного іонного обміну.

Накопичені дані в базах забезпечили репрезентативне інформаційне середовище для вибору фізико-хімічних критеріїв оцінки рафінуючих властивостей шлаків. Використовуючи параметри фізико-хімічної моделі структури шлакових розплавів, вдалося здійснити порівняльний аналіз доступних

методик визначення рафінуючої здатності шлаків на основі різноманітних співвідношень.

Особливу увагу приділено розрахункам сіркопоглинальної здатності шлаків із позиції термодинаміки, включаючи використання показника оптичної основності λ. У дослідженнях встановлено, що функція цього показника переходить до зв'язку між величинами Δe і ρ.

Аналіз літературних даних щодо сіркопоглинальної здатності шлаків ($C_S$) виявив, що цей параметр визначається інтегральними критеріями Δe і ρ. Крім того, результати пофакторного аналізу із застосуванням АСОД показали, що на сіркопоглинальну здатність впливає середньостатистичний заряд аніонів у взаємозв'язку аніон-катіон.

$$\mathrm{Lg}C_S = 0.187\Delta e + 12.455\rho - 0.214Z_{(a-k)} - 7.783 \qquad \text{R= 0.98 (3.33);}$$

Запропонована прогнозна модель була перевірена на масиві експериментальних даних Г. І. Жмойдина для системи $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2\text{-}CaF_2$. Точність наближення експериментальних даних до прогнозної залежності (3.18) характеризується високим коефіцієнтом кореляції R = 0.96. Великий діапазон концентрацій різних компонентів шлакових розплавів та варіативність їх показників дозволяють рекомендувати отриману залежність (3.18) для оцінки здатності промислових шлаків усіх металургійних процесів до поглинання сірки.

Для визначення фізико-хімічних критеріїв оцінки рафінуючих властивостей шлаків були проаналізовані склади синтетичних шлаків, що застосовуються в ковшовій металургії. Унаслідок того, що переваги й недоліки кожної композиції значною мірою залежать від конкретних умов її використання та поставлених цілей, загальне теоретичне узагальнення накопиченого досвіду на даний момент не сформульовано.

Критерії Δe та $Z^Y$, що використовуються, характеризують розплави як гомогенні системи. Це припущення певною мірою ідеалізує стан їхньої структури. Пошук шляхів додаткового обліку впливу її мікронеоднорідності на властивості розплавів дозволив встановити, що такий системний облік можна забезпечити,

розрахувавши надмірні значення параметрів $Z^Y$ та d. Відповідні значення $\Delta Z^Y$ та $\Delta$d визначаються як різниця між $Z^Y$ та d, розрахованими для розплаву як хімічно єдиної системи, $d_{см}$ та $Z^Y_{см}$ для суміші відповідних компонентів

Розроблена методика обліку потенційної мікронеоднорідності структури оксидних розплавів базується на кількісному визначенні ступеня відхилення хімічного еквівалента ($\Delta$e) та структурного параметра (d) реальних розплавів від вихідних компонентів, що обчислюються для механічних сумішей, записаних у вигляді $k_ia_i$:

$$\Delta\Delta e = \Delta e \cdot \left[(k_{\text{mi}})\left(A_{\text{tj}}\right)\right] - \sum_{i=1,\dots,m} \Delta \text{ek}_i a_i n_i \qquad (3.34);$$

тут $k_ia_i$ – сполуки типу FeO, CaO, $SiO_2$ тощо; $\left[(k_{\text{mi}})\left(A_{\text{tj}}\right)\right]$- формалізований запис катіонної та аніонної грат. Параметр $\Delta$d обчислюється аналогічно.

На прикладі прогнозування ентальпії змішування $\Delta$H добре вивчених двокомпонентних систем CaO-MgO, CaO-MnO, NiO-MgO та NiO-MnO для об’єднаного масиву даних (n=68) отримано рівняння (R=0.97):

$$\Delta H = -515.71 + 2.9\Delta e_{\text{ш}} + 158{,}55 d_{\text{ш}} + 6484{,}4\Delta\Delta e_{\text{ш}} + 17397{,}1\Delta d_{\text{ш}} \quad (3.35);$$

Облік параметрів мікронеоднорідності $\Delta\delta$e та $\Delta d_{ш}$ істотно підвищує точність опису зазначеної характеристики від R=0.63 при $\Delta H = f(\Delta e_{ш}, d_{ш})$ до R=0.97 за формулою (3.20).

Під час оновлення баз даних були уточнені моделі, що описують в’язкість, плавність, поверхневий натяг і щільність шлакових розплавів у доменному та сталеплавильному виробництвах.

Виявлено доцільність індивідуального аналізу окремих груп шлакових розплавів, характерних для різних сировинних умов підприємств.

Зокрема, проведено аналіз експериментальних даних про в’язкість шлаків при різних температурах і плавність синтетичних та промислових титановмісних шлаків за результатами досліджень Н. Л. Жило та його колег:

$$\eta_{1500} = 4{,}037 - 4{,}765\rho + 0{,}186\Delta e + 0.0004(15 - \text{TiO}_2)^2 \text{Па·с} \qquad \text{R= 0.86 (3.36);}$$

Алгоритми, побудовані на основі зазначених рівнянь, інтегровані в програму для розрахунку складу і властивостей титановмісних шлаків, що використовуються у доменних печах. Доменні шлаки вирізняються високим вмістом оксидів алюмінію (до 20%) та магнію (до 25%). Присутність у шлаках "спадкових" твердофазних магнезіальних сполук спричиняє гетерогенність розплавів. Це, у свою чергу, збільшує їхню в'язкість і знижує плинність, що негативно впливає на шлаковий режим доменної плавки.

Порівняння розрахованих за цією формулою значень $T^{р}_{кр}$ магнезіально-глиноземистих шлаків з експериментальними $T^{э}_{кр}$ за даними робіт В.П. Горбачева зі співробітниками свідчить про достатню для практичних цілей точність прогнозування

$$\eta_{1350} = -20{,}07 - 0{,}91\Delta e + 136.88\mathrm{tg}\alpha \qquad R= 0.74 \ (3.37);$$

Отримані моделі стали основою алгоритму для прогнозування складу та властивостей як первинних, так і кінцевих шлаків залежно від складу подачі в умовах шихти доменних печей Запоріжсталі.

Аналіз експериментальних даних щодо властивостей шлаків, накопичених у базі «Шлакоутворювальні суміші», дозволив створити прогнозні моделі, які з достатньою точністю для практичного використання забезпечують розрахунок комплексу властивостей, що визначають технологічну придатність цих сумішей. В’язкість при різних температурах (Па·с):

$$\lg\eta_{1200} = 9.745 - 1.622\Delta e + 2.82\rho - 5.594d + 9.004\mathrm{tg}\alpha \qquad (3.38);$$

$$\lg\eta_{1300} = 8.5 - 1.513\Delta e + 2.512\rho - 5.185d + 10.12\mathrm{tg}\alpha \qquad (3.39);$$

$$\lg\eta_{1400} = 7.429 - 1.425\Delta e + 2.493\rho - 4.833d + 9.763\mathrm{tg}\alpha \qquad (3.40);$$

$$\lg\eta_{1500} = 6.414 - 1.275\Delta e + 2.361\rho - 4.34d + 7.948\mathrm{tg}\alpha \qquad (3.41);$$

## 3.3 Віскозиметрія металургійних розплавів

### 3.3.1 Методи виміру в’язкості металургійних розплавів

У основі теорії будь-якого методу віскозиметрії лежить аналіз системи, у якій відбувається рух рідини або тіла, що взаємодіє з цією рідиною. Через розв’язання відповідної гідродинамічної задачі встановлюють залежність показника в’язкості від експериментально отриманих параметрів, які характеризують цей рух. При цьому передбачається, що:

1) Рідина є однорідною і не містить жодних зовнішніх збурень — конвективних потоків, спливання газових бульбашок тощо.

2) Швидкість відносного руху між тілом і рідиною настільки мала, що забезпечується ламінарна течія у стабільному режимі.

3) Незалежно від ступеня змочування ковзання між рідиною та поверхнею тіла не спостерігається, хоча це припущення не завжди доведено теоретично.

4) Рух нестискаємої рідини описується рівняннями Нав'є-Стокса.

Під час аналізу віскозиметричних даних необхідно враховувати вказані обмеження. Надійна теорія методу віскозиметрії має бути здатною охоплювати як абсолютний (з аналітичною залежністю в’язкості від вимірюваних величин), так і відносний (порівняльний або градуювальний) підхід до визначення показника в’язкості.

Реальні рідини часто не підкоряються рівнянню Ньютона у класичному розумінні, коли приймається, що $\eta = \text{const}$. У такому разі говорять про аномалію в’язкості і відповідно про аномально в’язку (неньютонівську) рідину. Графік залежності між $\frac{\mathrm{dV}}{\mathrm{dx}}$ і напругою зсуву $\frac{F}{S}$ для ньютонівських рідин – пряма, для неньютонівських – криві, всі вони називаються кривими течії. Металургійні розплави (метали та шлаки) прийнято поки вважати ньютонівськими рідинами.

Таким чином, в’язкість металургійних розплавів може коливатися в межах від 0,001 до 10 Па•с, і важливо, щоб один прилад міг охопити цей діапазон із мінімальною похибкою. Це завдання є досить складним навіть за нормальних умов, а при високих температурах у металургії воно ускладнюється ще більше. Адже набір матеріалів, придатних для використання в таких умовах, різко

зменшується, і при температурах понад 1400 °C вибір відповідних конструкційних матеріалів стає вкрай обмеженим. До того ж, навіть ці матеріали в тому чи іншому ступені вступають у взаємодію з розплавом, який досліджується. Тому однією з основних проблем високотемпературної віскозиметрії є пошук відповідного матеріалу для контакту з досліджуваною речовиною та врахування наслідків їхньої взаємодії.

Крім цього, важливо забезпечити контроль за вмістом газів як у самому розплаві, так і в газовій фазі над ним. Якщо це неможливо зробити під час експерименту, то необхідно здійснити аналіз щонайменше після його завершення. Такий контроль дозволяє коректно інтерпретувати отримані результати. Також само собою зрозуміло, що процес вимірювання в'язкості має відповідати всім строгим вимогам високотемпературного теплофізичного експерименту.

Вищезазначені особливості значно звужують вибір методів віскозиметрії, які можна застосувати для дослідження в'язкості металургійних розплавів.

### 3.3.2 Метод капілярної течії

Найстаріший і традиційний метод віскозиметрії заснований на законі Пуазейля (1840):

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p \tau}{8\mathrm{VI}} \qquad (3.42),$$

де r - радіус капіляра довжиною l; Δp - постійний перепад тисків на його кінцях; V — обсяг рідини, що витікає, за час τ (вимірювана в досвіді величина).

Всупереч поширеній думці, метод базується на теорії, яка в деяких аспектах залишається недосконалою: необхідно враховувати низку поправок, які часто мають невизначений характер через специфіку поведінки рідини в капілярі та при її виході з резервуара. У разі точних вимірювань також зважають на такі чинники, як неправильність форми капіляра, поверхневий натяг рідини тощо. Загальна сума

цих поправок може досягати 20% виміряного значення в’язкості, особливо якщо сама в’язкість є низькою. Проте завдяки простоті, зручності й універсальності для звичайних температур метод капілярного стікання був удосконалений багатьма дослідниками до надзвичайно високого рівня точності. Еталонні віскозиметри у багатьох країнах ґрунтуються саме на капілярній методиці. Однак навіть у цих приладах похибка визначення в’язкості залишається низькою (до 0,3%) лише за умови вимірювання в’язкості рідин з низьким рівнем опору, таких як вода. Порівняння вищих значень в’язкості із в’язкістю води, що слугує еталонним орієнтиром, здійснюється шляхом використання послідовних приладів та проміжних референсних рідин. Такий підхід призводить до помітного зростання похибки вимірювань, яка зростає пропорційно збільшенню в’язкості рідини.

Ще складніше використовувати капілярний метод для визначення в’язкості розплавів при високих температурах. Згідно з численними дослідженнями, основні труднощі цього процесу є суто технічними: вони пов’язані з вибором матеріалу для виготовлення капіляра, технологічними аспектами його створення, способом фіксації руху розплаву в непрозорому віскозиметрі, відкладенням нерозчинних домішок на його стінках та корозійними процесами, які викликають руйнування самого капіляра. Через ці проблеми застосування методу капілярного стікання для визначення в’язкості розплавів за умов високих температур нині суттєво обмежене.

### 3.3.3 Метод тіла, що рухається в рідині

Він заснований на законі Стокса (1850):

$$F_\eta = 6\pi \mathrm{V} r \eta \qquad (3.43),$$

де $F_\eta$ — сила в'язкого опору, що діє на шар радіусом r, що рухається в нескінченній рідині зі швидкістю v (вимірювана величина). Якщо куля має щільність $\rho_2$, а рідина $\rho_1$, то при падінні її під дією сили тяжіння:

$$\eta = \frac{2}{9V} r^2 g(\rho_1 - \rho_2) \quad (3.44).$$

Теорія методу вимагає врахування поправок на крайовий ефект, який виникає через вплив стінок посудини з рідиною. Існує кілька відомих математичних описів цього явища, створених Ладенбургом (1907), Факсеном (1920) та Френсісом (1933). Проведення вимірювань ускладнюється тим, що перед тим, як кулька досягне своєї постійної кінцевої швидкості, необхідний певний час. Водночас важко забезпечити введення кульки в рідину без додаткових поштовхів, які можуть призвести до відхилень від осьового напрямку під час її падіння в посудині, а також уникнути впливу спускового пристрою на початкову швидкість кульки. Крім того, є низка інших експериментальних труднощів, які роблять цей метод складнішим, ніж може видатися на перший погляд.

Використання цього методу за високих температур супроводжується ще більш серйозними викликами. Зокрема, це потреба у значній довжині посудини з розплавом і складність забезпечення рівномірного розподілу температури в його об’ємі. Крім того, для експериментів потрібне виготовлення ідеально круглих кульок дуже малого діаметра, а також складність спостереження за їхнім рухом у непрозорій посудині. Для цього можуть використовуватися рентгенівські промені, радіоактивні ізотопи або електромагнітні поля. Цей метод не застосовується при дослідженні розплавів металів, оскільки найбільш надійні результати отримують у діапазоні в’язкості 0,001–10 МПа·с. Проте для визначення в’язкості шлаків і скла метод часто застосовується з модифікацією: кульку витягують із розплаву під впливом певного навантаження.

Утім, цей варіант має свої особливі недоліки. Потрібно враховувати вплив сил поверхневого натягу, які діють на нитку, до якої прикріплена кулька. Також є ризик налипання розплаву на нитку і його подальшого застигнення, що може вплинути на точність результатів.

### 3.3.4 Ротаційні методи

В основі явища лежить закон руху рідини в проміжку між двома співвісними тілами, такими як циліндри, конуси, сфери чи їхні комбінації. Одне з цих тіл (ротор) обертається, тоді як інше залишається нерухомим. Для визначення в'язкості використовують дві основні методики: за виміряним крутним моментом при відомій кутовій швидкості (методика Маргулеса-Куетта, 1881–1890) або за кутовою швидкістю при заданому крутному моменті (методика Сирля, 1912). Якщо припустити, що рідина між співвісними циліндрами рухається в режимі ламінарного потоку, тоді в'язкість можна обчислити за допомогою рівняння Нав'є (1823):

$$\eta = \frac{M(R^2 - r^2)}{4\pi\omega L R^2 r^2} \qquad (3.45),$$

де M - крутний момент (вимірювана величина); R - радіус зовнішнього циліндра; r - радіус внутрішнього циліндра; w - кутова швидкість обертання зовнішнього циліндра; L — висота шару рідини, що обертається.

Рівняння (3.45) було отримано для випадку нескінченно довгих циліндрів. Однак на практиці необхідно враховувати вплив кінців внутрішнього циліндра і основи зовнішнього. Для цього існує кілька підходів.

Ротаційний метод, або метод коаксіальних (концентричних) циліндрів, здобув значну популярність у науці та техніці. Він активно застосовується у високотемпературній віскозиметрії, зокрема для шлаків і скла. Незважаючи на це, використання методу потребує виконання важливої умови його теоретичної основи — забезпечення високої співвісності поверхонь при мінімальному зазорі між ними. Ця вимога є критичною для досягнення однорідності поля зсувного напруження в рідині, що деформується. Найбільше труднощів виникає у варіації методу, де нерухоме тіло, занурене в розплав, фіксується на пружній нитці і не має жорсткої стабільності у горизонтальній площині.

Низька в'язкість металевих і деяких шлакових розплавів, а також порівняно малі крутні моменти, що передаються між циліндрами, разом зі значними і непостійними силами тертя в підшипниках віскозиметра, створюють обмеження нижньої межі вимірювань в'язкості під час використання цього методу. Загальна похибка вимірювань за звичайних температур зазвичай оцінюється у межах 3-5%, але в умовах температур сталеплавильних процесів вона може бути істотно більшою.

### 3.3.5 Методи крутильних коливань

Метод крутильних коливань тіл обертання в рідині базується на розв'язанні зовнішньої гідродинамічної задачі (Стокс, 1850). Для визначення в'язкості, спираючись на низку теоретичних припущень, здійснюється вимірювання логарифмічного декремента затухання крутильних вільних коливань тіла обертання у рідині, а також проводиться його оцифровка. У цьому процесі використовуються складні формули, розроблені Мейером (1861) для диска та Вершаффельтом (1915) для кулі.

Незважаючи на складнощі математичної обробки, метод крутильних коливань кулі раніше активно застосовували для визначення в'язкості матеріалів, таких як сталь, чавун, алюміній, олово та інші метали. Проте результати досліджень не завжди підтверджувалися альтернативними методами. У проведеній роботі було здійснено аналіз джерел експериментальних похибок і оцінено потенціал цього методу. Головною причиною похибок вважається гальмівний вплив поверхневої плівки металу на коливання тіла, підвішеного на дроті, що складно точно врахувати. Окрім того, для підвішування кулі на дроті необхідно забезпечити її занурення у досліджувану рідину, що не завжди можливо без додаткового навантаження в незануреній частині коливальної системи. Водночас підвищення центру тяжіння системи може призводити до прецесійних рухів і динамічної нестійкості, що спотворює значення декремента згасання.

Через зазначені недоліки цей метод наразі майже не застосовується у віскозиметрії металургійних розплавів.

*Метод крутильних коливань судини з рідиною* ґрунтується на розв'язанні внутрішньої гідродинамічної задачі. Для циліндричної посудини, заповненої рідиною, де з часом затухають крутильні коливання навколо її осі, перше розв'язання запропонував Мейєр у 1891 році. Пізніше його вдосконалили й математично довели Швидковський (1944–1953) та Роско (1958). Щодо сферичної посудини з рідиною, перше розв’язання дав Вершаффельт у 1915 році, а його теоретичний розвиток продовжили Андраде (1936–1952) та Роско.

Дослідження показали, що вимірюваний у цьому методі логарифмічний декремент затухання змінюється залежно від в'язкості досліджуваної рідини неоднозначно. Спочатку, із підвищенням в'язкості, декремент зростає. Проте після досягнення максимуму він починає знижуватися зі зменшенням в'язкості. У зоні максимального логарифмічного декременту чутливість методу до змін в'язкості істотно знижується. Тому розв'язок гідродинамічної задачі подається окремо для рідин із високою, середньою і низькою в'язкістю.

У випадку коливань кулі розрахункова формула виходить відносно простою. Проте практична реалізація вимог теорії стикається з технічними труднощами — це стосується виготовлення ідеально сферичної поверхні із заданим внутрішнім діаметром (який у формулі підноситься до третього ступеня), забезпечення можливості вільного розширення розплаву при зміні температури тощо. Через це у сучасній експериментальній металургії цей варіант методу має переважно історичну цінність.

Більш технологічним і простішим для застосування у високотемпературних умовах вважається метод затухаючих крутильних коливань циліндричної судини (наприклад, стаканчика). За останні десятиліття саме цей варіант дозволив виконати більшість досліджень кінематичної в'язкості розплавлених металів. Метод детально описаний у низці спеціалізованих монографій, тож детально зупинятися на ньому немає потреби. Варто лише згадати, що загальноприйняті оцінки його похибки в межах 3–5 %, а тим більше 1 %, видаються надто оптимістичними. Згідно з комп'ютерним моделюванням ідеального віскозиметра

такого типу, який би повністю відповідав умовам гідродинамічної задачі, похибка вимірювання величини υ істотно залежить від її абсолютного значення і коливається в межах 6–10 % у діапазоні υ = $10^{-6}$–$10^{-4}$ м²/с. У реальних експериментальних умовах додатковий вплив чинять побічні фактори, такі як взаємодія розплаву з матеріалом тигля та газовою фазою, утворення газових бульбашок, частина яких осідає на внутрішніх стінках тигля, підняття неметалевих включень на поверхню, а також можливе викривлення форми тигля чи його децентрування. Усе це може суттєво вплинути на точність вимірювань і збільшити загальну похибку експерименту до 20–30 %.

*Метод поступальних коливань тіла в рідині*, або вібраційний метод, ґрунтується на розв'язанні зовнішньої гідродинамічної задачі, яка бере свій початок у роботах Стокса (1850) і Бусінеску (1878). Як метод визначення в'язкості він був сформований після досліджень Вудворда (1952), Лєскова та Шевченка (1956). Значний внесок у його розвиток зробили радянські науковці: Росин (1960–1966), Соловйов і Каплун (1970), Крутин (1973, 1985). Основна ідея методу полягає у встановленні функціонального зв’язку між в’язкістю та щільністю рідини і параметрами поступальних коливань твердого тіла, зануреного в цю рідину. Хоч пристрої для реалізації методу виглядають зовні досить простими, математичне визначення такого зв’язку є складним завданням, здебільшого через необхідність врахування граничних умов. З точки зору чутливості до вимірюваної величини в’язкості цей метод перевершує альтернативні підходи. До його переваг належить широкий діапазон вимірювань в’язкості однією й тією ж установкою (від $10^{-3}$ до $10^{3}$ Пас), можливість проводити дослідження за екстремальних температур і високого тиску, а також потенціал до повної автоматизації.

Проте метод часто стикається із певною недовірою, що здебільшого зумовлено сумними наслідками невдалого використання недосконалих конструкцій вібраційних віскозиметрів. Це також пояснюється недостатнім рівнем теоретичної підготовки експериментаторів, які порушують основні принципи роботи методу (наприклад, називаючи зонд вібровіскозиметра шпинделем), а також обмеженою глибиною теоретичних напрацювань у цій сфері.

Як показує аналіз застосування вібраційної віскозиметрії у дослідженні металургійних розплавів, даний метод до розплавів металів використовувався досить ефективно й обґрунтовано. Водночас велика кількість робіт, присвячених дослідженню шлакових розплавів за допомогою цього методу, включно із тими, що ввійшли до довідкових видань, містить очевидні методичні помилки, через які отримані результати викликають сумнів.

### 3.3.6 Суперечливість даних щодо в'язкості шлакових розплавів

Перші результати досліджень в'язкості доменних шлаків, проведені у 1917—1931 роках різними американськими дослідниками, виявили значні розбіжності. Для простих бінарних сумішей, таких як $CaO\text{-}SiO_2$, спостерігалася настільки велика суперечність, що зробити загальні висновки про відповідність ізотерм в'язкості діаграмам стану було неможливо. Усі ці експерименти виконувалися за схожою методикою: тіло (циліндр), прикріплене до дроту, занурювали в розплав і обертали тигель, щоб виміряти в'язкість. Однією з можливих причин розбіжності результатів могло бути використання графіту як матеріалу для циліндра. Як самі автори зазначали, під час експериментів спостерігалося прослизання розплаву уздовж поверхні графітового циліндра — це явище пояснювали виділенням бульбашок CO через окислення графіту шлаком, що спричиняло ефект ковзання.

Станом на сьогодні накопичено значний обсяг експериментальних даних щодо в'язкості різних шлакових розплавів та рідкого скла подібної природи. Графіт майже перестали використовувати для виготовлення тиглів і робочих елементів віскозиметрів. Конструкції приладів та методи вимірювання стали значно точнішими й надійнішими порівняно з початком XX століття. Однак навіть зараз немає такого виду шлаку, значення в'язкості якого в різних дослідженнях співпадали б у межах похибки методів вимірювання. Результати часто істотно відрізняються. Наприклад, згідно з даними восьми дослідників, в'язкість розплаву з 80% FeO і 20% SiO2 коливається від 3 до 30 мПа·с — різниця сягає порядку величини. Ще більш вираженим є розбіжності для розплаву CaF2:

вони майже дорівнюють двом порядкам. У деяких випадках відмінності мають не лише кількісну, але й якісну природу. Наприклад, у висновках про вплив добавок кремнезему на в'язкість вапняно-глиноземистих розплавів дослідники дійшли абсолютно протилежних думок.

Визначити, наскільки дані експериментів є достовірними і точно відображають властивості систем, часто складно або навіть неможливо. На жаль, автори робіт рідко надають детальний опис методології своїх досліджень.

## 3.4 Розрахунок в'язкості металургійних шлаків за теорією Е.В. Приходька

### 3.4.1 Модель шлаку як системи неполяризованих іонних радіусів

Модель отримала назву "система неполяризованих іонних радіусів" (СНІР). У цій концепції шлаковий розплав розглядається як хімічно однорідна система. Вплив складу на структуру та властивості розплаву залежить від характеристик міжатомних зв'язків у безперервному аніонному каркасі (або його підгратці).

На основі визначення ефективних зарядів z і радіусів іонів $Ru_z$, із використанням даних про міжіонні відстані d, формується й розв’язується система рівнянь. Це дозволяє обчислювати ряд середньостатистичних параметрів, які описують композицію як єдине хімічне ціле, що є важливим для прогнозування властивостей розплаву. Наприклад, у випадку взаємодії іонів A і B на певній відстані d формується система:

$$\begin{cases} Ru_A^{z_A} + Ru_B^{z_B} = d \\ \lg Ru_A^{z_A} = \lg Ru_A^0 - \left(z_{\min_A} + \Delta e/2\right) tg\alpha_A \\ \lg Ru_B^{z_B} = \lg Ru_B^0 - \left(z_{\min_B} + \Delta e/2\right) tg\alpha_B \end{cases} \quad (3.46),$$

де ефективні заряди включають сферичну ($z_{min}$) та спрямовану (Δe/2) компоненти, тобто $z_A = z_{\min_A} + De/2 i z_A + z_B = De$. До того ж ці ефективні заряди є дробовими. Тут Δe - середньостатистичне число електронів, що локалізуються на сполучних орбіталях у напрямку зв'язку метал - аніон. Цей параметр виконує

функції хімічного еквівалента системи. Існують й інші модельні параметри - ρ та tgα. Параметр ρ - це зарядова щільність, яка може бути об'ємною та сферичною. Параметр tgα визначає індивідуальність катіонної ґрати шлаку. Введення чотирьох параметрів Δe, ρ, d, tgα дозволило узагальнити досвідчені дані з урахуванням використання рівнянь CHIP, т. е. ці параметри замінюють і відбивають склад шлаку.

Спираючись на зазначені параметри та результати досліджень властивостей шлакових розплавів, Е. В. Приходько визначив кореляційні залежності між сукупностями цих параметрів і характеристиками шлаків. Він представив їх у формі рівнянь для динамічної та кінематичної в'язкості, електропровідності, поверхневого натягу, щільності, а також температур початку й завершення кристалізації фізико-хімічних властивостей.

## 3.5 Загальна характеристика вібровіскозиметрів

Вібровіскозиметри використовуються для оцінки в'язкості шлакових розплавів, що є надзвичайно важливим параметром у процесах виплавки сталі та обробки матеріалів за високих температур, які досягають 1600°C і більше. В'язкість шлаку суттєво впливає на ефективність рафінування, стан футерування печей і якість отриманого металу.

Основні характеристики та принцип роботи вібровіскозиметрів для контролю шлаків:

• Принцип роботи: Метод побудований на аналізі загасання коливань датчика (зонда), що перебуває в розплаві, або на вимірюванні резонансної частоти вимушених коливань, яка залежить від в'язкості середовища.

• Підходящі матеріали для екстремальних умов: Датчики пристрою виготовляють з тугоплавких матеріалів, здатних витримувати агресивні умови розплавленого шлаку.

• Переваги технології: Забезпечується висока ступінь точності вимірювань, можливість безперервного моніторингу процесу та чутливість до незначних змін у характеристиках середовища.

• Альтернативні рішення: Для аналізу шлаків також використовуються електроротаційні віскозиметри, які охоплюють діапазон в'язкості від 0,05 до 10 Па·с.

Практичне застосування в металургії:

1. Контроль шлакоутворювальних сумішей (ШОС): Вібровіскозиметри широко застосовуються для моніторингу компонентів, таких як тверде паливо, зола та шлаки.

2. Аналіз гомогенності: Методом віскозиметрії визначають присутність нерозчинених оксидів, зокрема CaO та MgO, у рафінувальних шлаках автоматизованих конвертерних процесів (АКП).

3. Оптимізація складу: Вимірювання в'язкості дозволяє перевірити плинність шлаку за стандартної температури близько 1550°C, що критично важливо для забезпечення стабільності виробничих процесів.

## 3.6 Опис встановлення та методики вимірювань

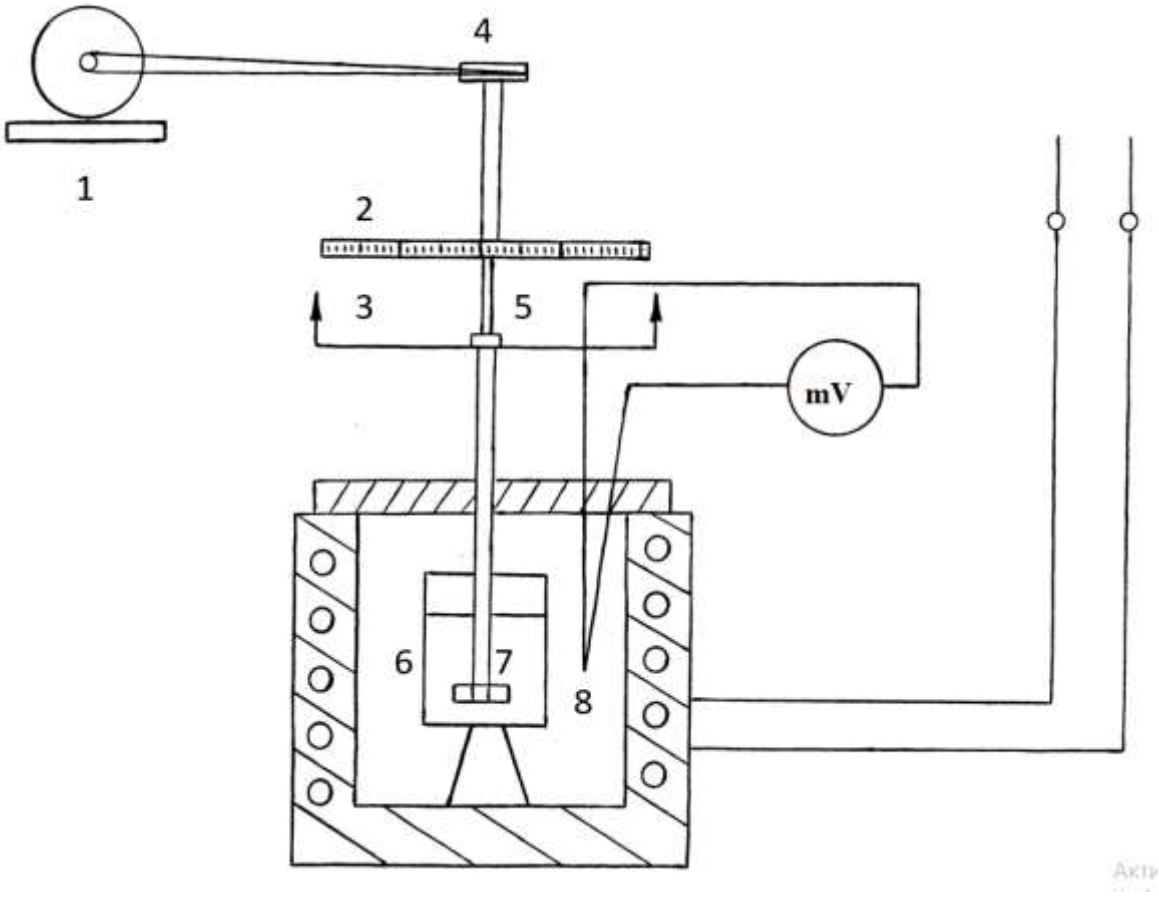
У електричну нагрівальну піч завантажують тигель із досліджуваним шлаком. Піч нагрівають до максимальної температури 940–950 °C. Після того, як шлак розплавиться, в нього на визначену глибину опускається циліндрична головка шпинделя віскозиметра (рис. 3.3).

Спочатку шпиндель встановлюється в нейтральне положення так, щоб стрілка віскозиметра знаходилася на позначці нуль. Потім запускають двигун, який приводить у рух верхню частину віскозиметра. Обертання шпинделя розпочинається лише тоді, коли крутний момент струни стане рівним моменту сил в’язкості шлаку. Фіксують кут відставання стрілки, закріпленої на шпинделі, φ, від нульового поділку шкали, яка нерухомо прикріплена до верхньої частини обертового віскозиметра. Для визначення середнього значення кута здійснюють кілька вимірювань при заданій температурі.

Після цього піч вимикають і проводять додаткові визначення кута φ під час поступового охолодження через кожні 20 °C. Найбільш оптимальним є виконання по 3–5 вимірів для кожної температури, обчислюючи середнє значення.

При досягненні температурного діапазону 650–680 °С починають виконувати зворотні вимірювання. У цьому випадку фіксують значення температури шлаку через кожні 5 одиниць збільшення кута закручування кругової шкали віскозиметра.

Дослід завершується у момент, коли стрілка віскозиметра відхилиться від нульового нейтрального положення на два повні обороти.




1 – електромотор; 2 – кільцева шкала; 3 - стрілка – покажчик; 4 – піч; 5 - сталева нитка (струна); 6 - тигель із розплавом шлаку; 7 – циліндр; 8 – термопара

Рисунок 3.3 – Схема установки для вимірювання в'язкості

Величина в'язкості визначається із співвідношення:

$$\eta = K \varphi,$$

де К - постійна віскозиметра, яку визначають на аналогічній установці, помістивши в тигель рідину з відомою в'язкістю $\eta_0$. Оскільки величина кута відставання стрілки віскозиметра залежить від об'єму та форми тигля, в якому знаходиться рідина, еталонні експерименти необхідно виконувати в тому самому

тиглі, що й дослідження. При цьому глибина занурення циліндра повинна залишатися незмінною. Під час вибору еталонної рідини слід враховувати, що результати оцінки в'язкості розплаву істотно залежать від її щільності. Тому щільність еталонної рідини має бути максимально близькою до щільності розплаву, який досліджується. Кут відставання стрілки віскозиметра ($\varphi_0$) в еталонній рідині використовують для розрахунків $K = \eta_0/\varphi_0$.

### 3.7 Зіставлення даних по в'язкості шлаків, отриманих з теорії Е.В. Приходько з даними, отриманими на вібровіскозиметрі

Для перевірки достовірності даних, отриманих у результаті розрахунків за різними модельними теоріями рідких шлаків, необхідно зіставити їх з експериментальними даними, зібраними за допомогою віскозиметрів різних конструкцій. Найбільш достовірними і менш суперечливими вважаються результати, здобуті методом вібровіскозиметрії. Цей метод забезпечує вищу точність у порівнянні з іншими методами вимірювання в'язкості, що особливо важливо при дослідженні металургійних шлаків, які характеризуються високотемпературними властивостями.

Розрахунки виконувались за методикою Е.В. Приходька, яка є однією з небагатьох теорій, що дозволяє напівемпіричним шляхом визначати в'язкість шлаків. Власне розрахунки здійснювались за допомогою комп'ютерної програми "Шлак-метал". У програму вводились кількість розрахункових точок, перелік компонентів шлаку і їх хімічний склад у відсотковому співвідношенні. Потім програмне забезпечення виконувало обчислення згідно із моделлю Е.В. Приходька та надавало значення в'язкості шлаків для заданих температурних умов: 1500, 1400 і 1300 °С. Вихідні дані, використані для розрахунків, наведені у таблицях 3.4-3.6, а результати представлені в таблицях 3.7-3.8.

Таблиця 3.4 – Хімічний склад та в'язкісно-плавкісні властивості шлаків із сумішей на основі цементу

| № | Вміст, мас. | | | | | | | Основні | $\eta_{1300}$ | $\eta_{1500}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ШОС | CaO | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | MgO | $CaF_2$ | $Na_2O$ | MnO | $CaO/SiO_2$ | Па·с | Па·с |
| 1 | 27,86 | 36,75 | 4,90 | 3,83 | 15,6 | 4,35 | 0,78 | 1,12 | 0,28 | 0,08 |
| 2 | 31,40 | 37,3 | 3,55 | 1,54 | 14,0 | 6,5 | 0,60 | 1,11 | 0,35 | - |
| 3 | 34,00 | 36,2 | 3,0 | 1,15 | 10,9 | 7,25 | - | 1,16 | 0,48 | 0.19 |
| 4 | 24,22 | 34,1 | 10,15 | 3,1 | 18.57 | 5,65 | 0,3 | 1,05 | 0,50 | - |
| 5 | 25,90 | 32,52 | 9,30 | 1,46 | 18,55 | 6,40 | - | 1,21 | 0,49 | 0,12 |

Таблиця 3.5 – Хімічний склад та в'язкісно-плавкісні властивості шлаків із виробничих сумішей на основі шлакових відходів електропічного виробництва марганцевих сплавів

| № | Вміст, мас. | | | | | | | | $\eta_{1300}$ | $\eta_{1500}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ШОС | CaO | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | MgO | $CaF_2$ | $Na_2O$ | MnO | FeO | Па·с | Па·с |
| 6 | 26,15 | 32,90 | 3,60 | 1,81 | 10,88 | 2,05 | 19,60 | 1,81 | 0,45 | 0,09 |
| 7 | 22,86 | 36,84 | 3,03 | 1,19 | 12,44 | 5,17 | 15,72 | - | 12 | - |

Таблиця 3.6 – Хімічний склад та в'язкісно-плавкісні властивості шлаків із сумішей, що містять основний або кислий шлаки виробництва марганцевих сплавів

| № | Вміст, мас. | | | | | | | Основність | $\eta_{1300}$ | $\eta_{1500}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ШОС | CaO | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | MgO | $CaF_2$ | $Na_2O$ | MnO | $CaO/SiO_2$ | Па·с | Па·с |
| 8 | 28,25 | 34,10 | 3,45 | 1,75 | 14,0 | 5,2.5 | 6,85 | 1,123 | 0,50 | 0,17 |
| 9 | 30,60 | 34,15 | 2,90 | 1,40 | 14,0 | 6,25 | 4,50 | 1,12 | 0,41 | 0,12 |
| 10 | 29,62 | 35,65 | 4,16 | 2,93 | 14,0 | 4,76 | 4,78 | 1,115 | 0,89 | 0,15 |
| 11 | 27,65 | 37,3 | 4,85 | 3,66 | 14,0 | 4,48 | 3,50 | 1,012 | 0,87 | 0,25 |
| 12 | 31,13 | 35,23 | 3,70 | 1,61 | 10,5 | 6,18 | 6,10 | 1,098 | 0,39 | 0,12 |

Таблиця 3.7 – В'язкості шлаків, Па·с, складу, що відповідає шлакам табл. 3.4-3.6, за різних температур, отримані розрахунком за програмою "Шлак-метал".

| № | t=1500 С | t=1400 С | t=1300 С |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,546 | 0,976 | 1,620 |
| 2 | 0,344 | 0,57 | 0,874 |
| 3 | 0,236 | 0,352 | 0,542 |
| 4 | 0,551 | 0,986 | 1,638 |
| 5 | 0,452 | 0,771 | 1,254 |
| 6 | 0,307 | 0,481 | 0,756 |
| 7 | 0,346 | 0,585 | 0,882 |
| 8 | 0,326 | 0,518 | 0,818 |
| 9 | 0,275 | 0,422 | 0,567 |
| 10 | 0,366 | 0,595 | 0,949 |
| 11 | 0,467 | 0,802 | 1,310 |
| 12 | 0,238 | 0,364 | 0,546 |

Таблиця 3.8 – Порівняння в'язкості шлаків отриманих розрахунком та експериментом

| № | $\eta_{1300\ розр.}$ | $\eta_{1300експ.}$ | $\eta_{1500розр.}$ | $\eta_{1500експ.}$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,620 | 0,280 | 0,546 | 0,080 |
| 3 | 0,542 | 0,480 | 0,236 | 0,190 |
| 5 | 1,254 | 0,490 | 0,452 | 0,120 |
| 6 | 0,756 | 0,450 | 0,307 | 0,090 |
| 8 | 0,818 | 0,500 | 0,326 | 0,170 |
| 9 | 0,567 | 0,410 | 0,275 | 0,120 |
| 10 | 0,949 | 0,890 | 0,366 | 0,150 |
| 11 | 1,310 | 0,870 | 0,467 | 0,250 |
| 12 | 0,546 | 0,390 | 0,238 | 0,120 |

З графіків на рисунку 3.4 видно, що зі зниженням температури в'язкість шлаку стрімко зростає. Це, ймовірно, пов’язано з утворенням більших кремнекисневих комплексів у структурі шлаку.

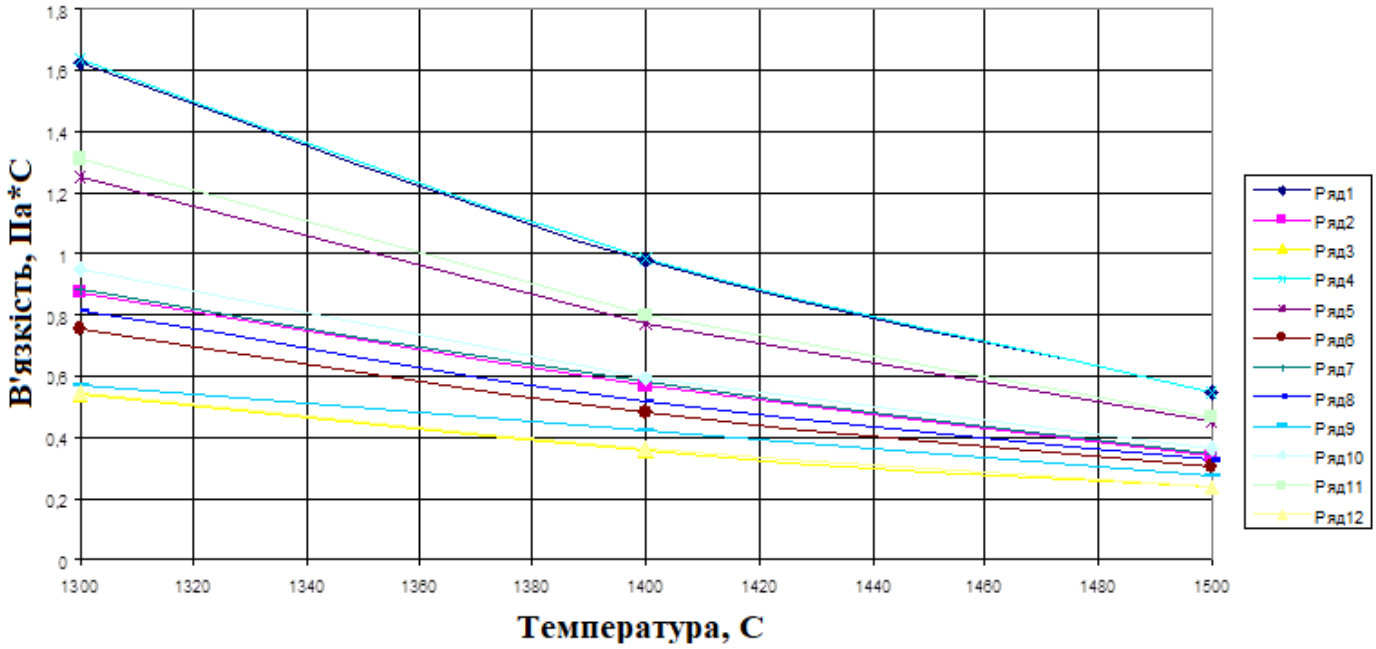



Рисунок 3.4 – Залежність в’язкості шлаків від температури

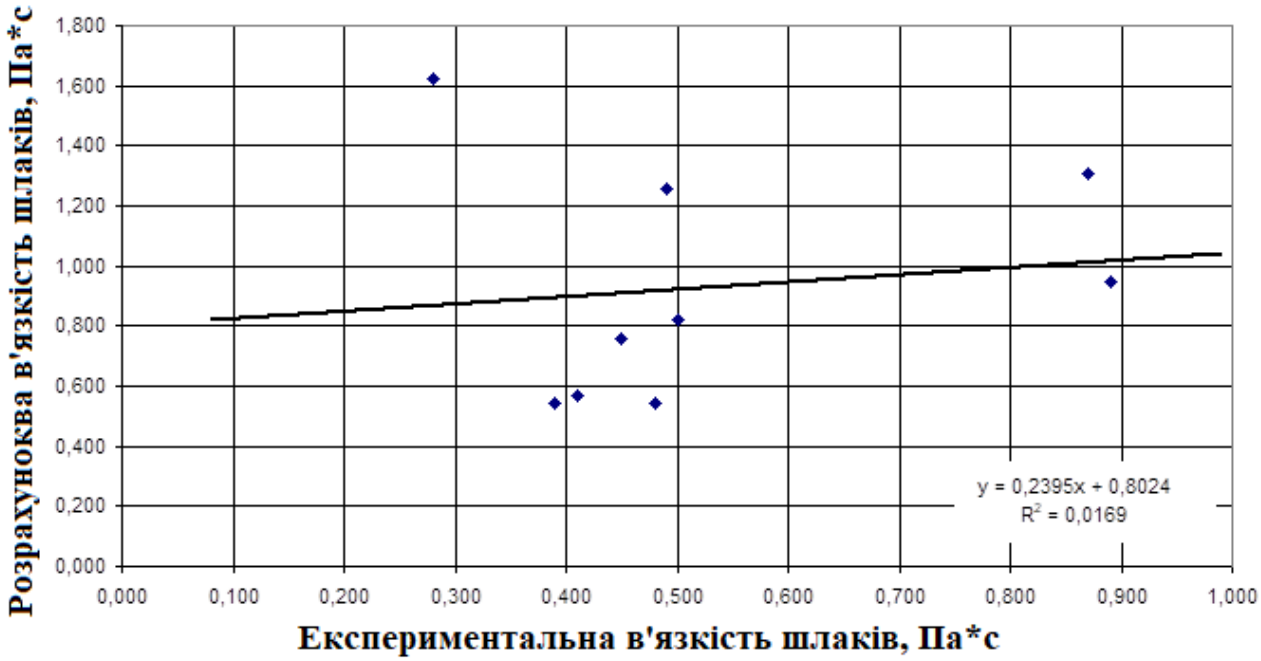



Рисунок 3.5 – Співставлення в’язкості шлаків при 1300 °С, отриманих розрахунком та експериментом

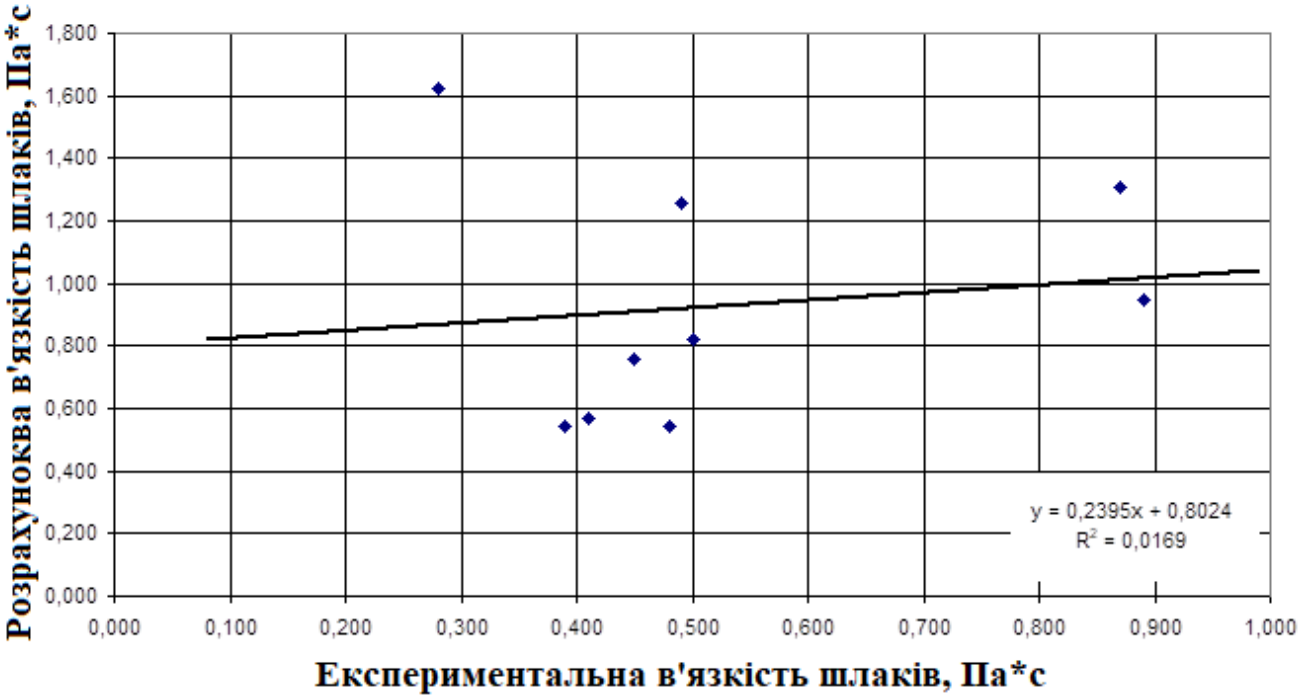



Рисунок 3.6 – Співставлення в’язкості шлаків при 1500 °С, отриманих розрахунком та експериментом

З графіків на рисунках 3.5–3.6 видно, що експериментальні дані, отримані методом вібровіскозиметрії, не цілком відповідають результатам, отриманим розрахунковим шляхом за моделлю іонних неполяризованих радіусів (теорія Е.В. Приходька). Це підтверджується надзвичайно низькими значеннями коефіцієнтів детермінації між обчисленими та експериментальними даними. Зокрема, коефіцієнт детермінації для 1300 °C становить R = 0,0169, а для 1500 °C — R = 0,001.

Ця значна невідповідність унеможливлює формування узагальнених висновків на основі отриманих даних. Ймовірні причини можуть бути пов’язані як із помилками при проведенні експериментів, так і з некоректним підбором напівемпіричних констант у моделі Е.В. Приходька. Варто зазначити, що практично не існує шлаків, для яких результати визначення в’язкості, отримані різними методами чи розрахунками за різними теоріями, збігалися б у межах допустимих похибок методів. Крім того, здебільшого неможливо об’єктивно оцінити, наскільки результати публікацій достовірно відображають реальні показники в’язкості досліджуваних систем.

# 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

## 4.1 Аналіз потенційний шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища цеху спецелектрометалургії

Під час виплавки сталі в установках спеціалізованої електрометалургії можуть виникати шкідливі виробничі чинники, що впливають на безпеку праці. До таких чинників належать теплові та світлові випромінювання, виділення пилу й газів у виробничі приміщення, а також шум і вібрація.

Основним джерелом небезпеки є процес плавлення у печі, який супроводжується значним виділенням газів і пилу, утворенням оксидів заліза та підвищенням температури навколишнього повітря. Крім того, під час випуску та розливу сталі також спостерігаються інтенсивні виділення пилу, газів і теплових випромінювань.

Факел полум’я, нагріта до високої температури вогнетривка футерівка внутрішнього простору печі, а також поверхня розплавленого металу та шлаку є основними джерелами випромінювання. Їх вплив стає найбільш помітним у моменти відкривання вікон печі. До інших джерел випромінювання належать рідкий шлак і розплавлений метал у процесах випуску та розливу сталі. Температура цих об’єктів часто перевищує 500 °С, тому спектр випромінювань містить світлові й інфрачервоні промені.

Персонал, зокрема сталевари та їхні помічники, піддається тепловому опроміненню, яке може варіюватися в межах від 698 до 6990 Вт/м². Інфрачервоні випромінювання мають суттєвий вплив на функціональний стан організму людини, особливо на центральну нервову систему та серцево-судинну систему.

Серед наслідків такого впливу спостерігається пришвидшення серцевого ритму, підвищення максимального і зниження мінімального артеріального тиску, частіше дихання, збільшення температури тіла та посилення потовиділення. Також зростає ризик розвитку захворювань серцево-судинної системи та органів травлення.

При тривалому перебуванні людини в зоні впливу інфрачервоного випромінювання, як і при систематичному впливі високих температур, у організмі порушується водно-сольовий баланс. Це може стати причиною розвитку так званої судомної хвороби. Окрім того, порушення теплового балансу призводить до захворювання, відомого як тепловий удар або гіпертермія.

У процесі виробничих операцій у повітря виділяються газоподібні шкідливі речовини. Основним джерелом забруднення є дугова піч. У разі порушення газодинамічних характеристик процесу, наприклад, через вибивання великих язиків полум'я з-під заслінок вікон або при випуску та розкисленні сталі в ковші, з робочої зони печі утворюються гази. Крім того, їх виділення може бути наслідком пошкоджень газових комунікацій.

У повітря робочого простору можуть потрапляти такі газоподібні речовини, як оксид вуглецю (CO), сірчистий ангідрид ($SO_2$), оксид азоту (NO) тощо. Зокрема, оксид вуглецю є продуктом неповного згоряння палива або утворюється внаслідок фізико-хімічних реакцій під час плавлення. Потрапляючи в організм через дихальні шляхи, він утворює карбоксигемоглобін, який значно знижує здатність крові переносити кисень до тканин. Це може спричинити кисневе голодування, особливо впливаючи на функціонування центральної нервової системи.

Сірчаний ангідрид має подразнювальну дію. При контакті з ним на біологічних тканинах виникає запальна реакція, яка насамперед вражає дихальні органи, шкіру та слизові оболонки очей. Що стосується оксиду азоту (II), то після його потрапляння у дихальні шляхи в крові утворюється метгемоглобін, що може викликати кашель, задишку, утруднене дихання та навіть набряк легень у важких випадках. Серед інших симптомів також відзначаються головний біль і серцева слабкість.

Крім газів, у виробничому приміщенні може накопичуватись значна кількість пилу під час таких операцій, як заправка подини, укосів чи інших елементів конструкції печі, а також підсипка порогів. Наявність пилу в повітрі, що містить оксиди кремнію, заліза та інші мінеральні компоненти, створює ризик розвитку професійних захворювань групи пневмоконіозів. Ці захворювання

спричиняють структурні зміни в легеневій тканині, що призводить до втрати її еластичності, порушення функцій легень та кровообігу. В результаті цього можуть виникати стани кисневого голодування. Гранично допустима концентрація пилу в повітрі виробничого приміщення не повинна перевищувати 4 мг/м³.

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого трудового процесу сталевара

| № | Чинники виробничого середовища і трудового процесу | Нормативне значення | Фактичне значення | III клас: шкідливі і небезпечні умови | | | Тривалість дії чинників за зміну % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | I ступінь | II ступінь | III ступінь | |
| 1 | Шкідливі хімічні речовини, мг/м³<br>1 клас небезпеки:<br>- ангідрид хромовий<br>- оксид марганцю<br>- нікель | <br><br>1,0<br>0,3<br>0,5 | <br><br>0,8<br>0,27<br>0,48 | | | | <br><br>80<br>80<br>80 |
| | 3-4 клас небезпеки:<br>- азоту диоксид<br>- ангідрид сірчаний<br>- оксид вуглецю | <br>2,0<br>10,0<br>20,0 | <br>1,7<br>10,0<br>18,7 | | | | <br>80<br>84,5<br>80 |
| 2 | Пил, з домішкою діоксиду кремнію 3,16 % | 4,0 | 3,9 | | | | 80 |
| 3 | Вібрація (загальна і локальна), дБ | 92 | 94 | - | - | 14 | 80 |
| 4 | Шум, дБА | 80 | 96 | 9 | - | - | 100 |
| 5 | Мікроклімат в приміщенні:<br>- температура повітря, ºС<br>- швидкість руху повітря, м/с<br>- відносна вологість, %<br>- інфрачервоне випромінювання, Вт/м² | <br>19<br>0,5<br>75<br>140 | <br>36<br>0,7<br>41<br>5275 | <br>-<br>1,6<br>-<br>- | <br>-<br>-<br>-<br>- | <br>13<br>-<br>-<br>5270 | <br>90<br>90<br>90<br>80 |
| 6 | Тяжкість праці | Важка III | | | | | |
| 7 | Напруженість праці | Напружена | | | | | |

Під час виконання окремих операцій технологічного процесу неминуче виникає шум механічного, аеродинамічного та термічного походження. Основними джерелами постійних шумових перевантажень є рух електромостових кранів, робота мотор-генераторів у машинних залах, витік повітря, згоряння палива і подібні процеси.

Шумові перевантаження можуть призводити до безсоння, зниження працездатності та навіть до серйозного професійного захворювання, такого як

туговухість. Вібрація своєю чергою впливає на нервову систему, викликаючи її розлади, а також на кровоносну систему, звужуючи капіляри. Це може провокувати розлади вегетативної нервової системи та порушення в роботі кістково-суглобового апарату. Тривалий вплив вібрації здатний сприяти виникненню серйозного захворювання — вібраційної хвороби.

Аналіз умов праці у цеху спецелектрометалургії під час виплавки сталі свідчить про перевищення допустимих нормативів рівня шуму, вібрації та інфрачервоного випромінювання. Крім того, концентрація пилу, оксиду вуглецю, ангідриду сірчаного, ангідриду хромового, а також оксиду марганцю і нікелю у повітрі робочої зони цеху суттєво перевищує гранично допустимі норми. Через це умови праці класифікуються як III клас 3 ступеня, що визначає робоче місце як небезпечне та шкідливе для здоров’я.

Для мінімізації негативного впливу тепла на організм людини необхідно обмежити його надмірне виділення у виробничих приміщеннях. Для цього рекомендують використовувати термоізоляцію печей шляхом встановлення спеціальних термоізоляційних листів. З метою видалення конвекційного тепла проводиться аерація через розміщення двох аераційних ліхтарів на даху будівлі цеху. Додатковим заходом боротьби із зайвим теплом є облаштування повітряного душа для сталеварів на робочому місці.

Важливою умовою для забезпечення комфортних умов праці є правильно організований повітрообмін. Надходження свіжого повітря в цех здійснюється через прорізи у стінах, фрамуги вікон та залізничні ворота. Прорізи в стінах оснащені поворотними панелями, а вікна обладнані фрамугами, що дає змогу регулювати потік повітря. У теплу пору року свіже повітря потрапляє в робочу зону через припливні отвори на її рівні, а у холодну — через отвори, розташовані не нижче ніж 4 метри від поверхні робочих майданчиків. Видалення повітря виконується за допомогою витяжних шахт та аераційних ліхтарів. Для зниження температури та усунення надлишкового тепла можливе використання дрібнодисперсного розпилення води на робочих місцях сталеварів.

Важливу роль відіграє обдування робітників прохолодним повітрям, яке подається за допомогою вентиляторів, температура повітря при цьому є нижчою

за температуру навколишнього середовища. Це сприяє охолодженню тіла та покращенню випаровування. Стаціонарні чи пересувні установки для повітряного душу встановлюються так, щоб потоки повітря були спрямовані прямо на робочі місця сталеварів, забезпечуючи ефективну рециркуляцію.

Захист працівників від шуму та вібрації забезпечується герметизацією повітропроводів, газопроводів та технічного обладнання, включаючи кожухи печей і теплообмінників. Важливу роль в зниженні впливу шуму та вібрації відіграють автоматизація та механізація виробничих процесів. Для мінімізації цих шкідливих факторів також використовуються амортизатори й ущільнення вентиляційних систем, амортизаційні підвіски на вібродвигунах.

Спецодяг виготовляється з бавовняних тканин із вогнетривкою пропиткою, а також із напіввовняних і суконних матеріалів. Для захисту очей і шкіри обличчя від бризок розплавленого металу, впливу ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання використовуються спеціальні окуляри з небиткого скла із боковим захистом або сітчасті маски. Робітники біля печей користуються захисним склом типу СС-14.

Шкіру рук, обличчя та шиї захищають за допомогою спеціальних паст, кремів і мазей. З метою індивідуальної охорони органів дихання від токсичних газів, парів і пилу застосовують респіратори (ШБ-1, У-2К, РП-К, «Астра-2») і промислові протигази. Від виробничого шуму у цеху працівники захищаються протишумовими вкладками з матеріалу ФПП-Ш («Беруші»), розрахованими на використання протягом одного дня, а також шумозахисними навушниками.

Для захисту від вібрації використовують рукавички з подвійним проміжним шаром із поролону. Крім того, застосовуються антивібраційні пояси, подушки, прокладки, спеціальне віброзахисне взуття та килимки.

## 4.2 Заходи з електробезпеки

Дія електричного струму на організм людини може становити серйозну загрозу для її здоров'я, а у крайніх випадках навіть призвести до летального наслідку. Ризик ураження струмом виникає при контакті людини з незаземленими струмоведучими частинами обладнання, такими як заливальний або розливний

кран, заправна машина тощо. У разі наявності високих температур цех відносять до другого класу електронебезпеки.

Вплив електричного струму на людину залежить від багатьох факторів, зокрема: загального фізичного стану, способу залучення тіла до електричного ланцюга та інших обставин. Існують порогові значення сили струму, вплив яких відчувається наступним чином:

- 0,6–1,5 мА при змінному струмі 50–60 Гц викликає легке тремтіння пальців;

- 5–10 мА спричиняє судоми рук;

- 20–25 мА – параліч рук, ускладнене дихання та сильні болі.

Струм, що проходить через людське тіло, чинить багатогранний вплив: фізіологічний, термічний, хімічний і механічний. Наприклад, електричний струм може нагрівати тканини до 50–60 °С, викликати розриви шкіри через нагрівання повітря, а також скорочення м'язів через їх збудження.

З метою запобігання нещасним випадкам необхідно забезпечити захист від надмірних струмів, уникати контакту зі струмоведучими частинами, а також запобігати торканню до неструмоведучих частин, які можуть випадково опинитися під напругою.

Щоб не допустити перевантаження електромережі, слід правильно обирати переріз електропровідників, уникати підключення додаткових неспроєктованих споживачів і не допускати перегрівання елементів електрообладнання понад допустимі межі. Для захисту від перевантаження мережі використовують плавкі запобіжники.

Захист від контакту зі струмоведучими частинами електрообладнання забезпечується шляхом ізоляції, встановлення огорожі чи блокування, дистанційного управління або відповідного розташування пристроїв у недоступному місці.

Для запобігання появі напруги на металевих корпусах обладнання через пошкодження ізоляції застосовується захисне заземлення.

До засобів захисту належать:

- монтажний інструмент (ізолюючі оперативні штанги, кліщі тощо);

- спеціальний одяг (гумові діелектричні рукавиці, боти, калоші, брезентові рукавиці, протигази, запобіжні пояси тощо);

- допоміжні пристрої (ізолюючі майданчики, підставки, ковпаки, накладки, тимчасові огородження); - вказівники напруги для визначення її наявності.

## 4.3 Заходи пожежної безпеки

Характерними причинами виникнення пожеж на виробництві є необережне поводження з вогнем, порушення технологічних процесів, несправності виробничого обладнання, неправильний монтаж або експлуатація електричних проводів і приладів, іскри від обладнання, а також утворення статичної електрики тощо. Щоб запобігти пожежам, необхідно усунути ці порушення.

В умовах роботи цеху, де постійно присутні розплавлений або нагрітий метал і шлак, скупчення горючих газів, а також масове використання кисню, особливо небезпечним стає порушення встановлених технологічних режимів і процедури виконання робіт.

Із найбільш поширених засобів гасіння пожеж є вода, проте вона не завжди підходить для цих цілей. На промислових підприємствах широко застосовують пінні вогнегасники. Для отримання хімічної піни використовують піногенераторні порошки типу ПГП і ПГПС, які складаються з кислотної та лужної компонент. Також застосовують повітряно-механічну піну, що є сумішшю повітря, води і піноутворювача, наприклад ПУ-1, ПУ-6, ПУ-1А, ПУ-1Д, з домішками гасового контакту, столярного клею й етилового спирту.

Для зниження інтенсивності горіння в осередок пожежі подають інертні гази (азот, діоксид вуглецю, димові або відпрацьовані гази) або водяну пару. Це дозволяє знизити концентрацію окислювача та уповільнити займистість до її повного припинення.

Тверді вогнегасні речовини у вигляді порошків ефективно застосовуються для ліквідації невеликих загорянь різних матеріалів та речовин, а також у ситуаціях, коли інші засоби гасіння є непридатними. Для цього створено спеціальні склади на кшталт ПС-1, ПС-2, СІ-2 і ПСБ.

Також для боротьби з пожежами застосовуються різноманітні типи вогнегасників, такі як рідинні, хімічно-пінні, повітряно-пінні, порошкові, вуглекислотні й хладонові.

Цех класифікується як категорія «Г» за вибухопожежною небезпекою. До цієї категорії належать виробничі приміщення, де:

- Використовуються негорючі матеріали в гарячому чи розплавленому стані; під час обробки виділяється променисте тепло, іскри чи полум'я.

- Застосовуються тверді, рідкі або газоподібні горючі речовини для утилізації або спалювання як палива.

Для забезпечення пожежної безпеки в цеху планується використання хімічних та пінних вогнегасників типу ВХП-10 із зарядом. Додатково будуть задіяні повітряно-пінні вогнегасники типу ВПП-5, ВПП-10 і ВППУ-250 у кількості 30 одиниць. Їх розмістять на протипожежних стендах для легкого доступу в разі потреби.

## 4.4 Технічні заходи виробничої санітарії

### 4.4.1 Освітлення виробничих приміщень

У цеху використовуватиметься як природне, так і штучне освітлення. Для освітлення приміщень планується застосовувати газорозрядні лампи низького та високого тиску, зокрема люмінесцентні та ДРЛ. Норма освітленості визначатиметься відповідно до характеристик зорової роботи, яка за ступенем складності поділяється на вісім розрядів із підрозрядами.

Металургійне виробництво належить до VII розряду зорової роботи, оскільки завдання пов’язані з матеріалами, що відбивають або випромінюють світло. Мінімальний рівень освітленості для робочих поверхонь та територій підприємств, які потребують обслуговування в аварійному режимі, має становити 5 % від робочого освітлення, але не менше ніж 2 лк у закритих приміщеннях і 1 лк на відкритих територіях.

Евакуаційне освітлення повинно забезпечувати мінімальну освітленість: на підлозі основних проходів, на ґрунті та сходах у приміщенні — не менш як 0,5 лк, а на відкритих територіях — щонайменше 0,2 лк.

### 4.4.2 Опалення і вентиляція

Для забезпечення належних умов роботи протягом року на робочих місцях встановлюються різні пристрої для опалення та вентиляції.

У приміщеннях, де персонал перебуває постійно або тривалий час у холодну пору року, впроваджується система опалення, зокрема батареї та калорифери. В'їзні й виїзні ворота обладнуються повітряними та тепловими завісами з механічними пристроями для автоматичного відчинення і зачинення. У ключових місцях управління виробничим процесом передбачено встановлення батарей із паровим опаленням.

У літню пору для очищення виробничого повітря і подачі свіжого використовується система кондиціювання. Санітарно-гігієнічний аспект вентиляції полягає у підтримці оптимального стану повітряного середовища відповідно до вимог санітарних і будівельних норм проектування різних типів споруд. Це забезпечується шляхом поглинання надлишків тепла та вологості притічним повітрям, розведенням шкідливих газів до гранично допустимих концентрацій, а також видаленням пилу та інших забруднюючих речовин разом із повітрям, що виходить за межі приміщення.

У виробничих умовах атмосферу приміщення можуть забруднювати теплота, волога (водяна пара), пил, гази та шкідливі випари. Волога надходить у повітря під час виробничих процесів, що мають контакт із водою (наприклад, миття виробів у ваннах чи вологе прибирання), а також утворюється від працівників як додаткове джерело шкідливих факторів. Підвищений рівень вологості може призводити до погіршення самопочуття працівників, знижуючи комфорт перебування у приміщенні.

## 4.5. Розрахунок аерації цеху

Аерація — це система вентиляції, яка використовує повітряний ліхтар, через який проходить свіже повітря, сприяючи охолодженню приміщення. У такій системі покриття повинно бути спроєктоване таким чином, щоб забезпечити правильний напрямок повітряних потоків, максимально ефективне та економічне видалення неорганізованих пилогазових викидів з місць утворення шкідливих речовин природним шляхом. Також ця конструкція унеможливлює накопичення пилу на її поверхнях.

Розрахунок температури повітря, яке виходить через повітряний ліхтар, передбачає:

$$t_{вих} = 25 + 1{,}2\ (10 - 2) = 34{,}6\ °C. \quad (4.1)$$

Встановлюємо середню температуру повітря в цеху:

$$t_{сер} = 0{,}5\ (\ 25 + 34{,}6\ ) = 29{,}8\ °C. \quad (4.2)$$

Встановлюємо щільність повітря по формулі $p = 353/(273 + t)$ відповідно при $t_н$, $t_{сер}$, $t_{вих}$:

$$P_н = 1{,}205\ кг/м^3;$$
$$P_{сер} = 1{,}165\ кг/м^3$$
$$P_{вих} = 1{,}15\ кг/м^3 \quad (4.3)$$

Встановлюємо необхідний повітрообмін

$$G_{пр} = G_{вих} = \frac{3{,}6 \cdot Q_{над}}{C(t_{вих} - t_{пр})} = \frac{3{,}6 \cdot 8 \cdot 10^5}{1(34{,}6 - 20)} = 197 \cdot 10^3\ кг/год \quad (4.4)$$

Встановлюємо умовний тиск на рівні середини приточних та витяжних пройомів, беручи за рівень розрахунку відмітку підлоги цеху:

$$P_{пр} = - gh_{пр} (p_н – p_{ср}) = - 9,81 \cdot 2 (1,205 – 1,165)= - 0,785 \text{ Па}; \quad (4.5)$$

$$P_{вит} = - gh_{вит} (p_н – p_{ср}) = - 9,81 \cdot 10(1,205 – 1,165) = - 3,92 \text{ Па}. \quad (4.6)$$

Встановлюємо розрахункову різницю тисків між приточними та витяжними пройомами:

$$\Delta p = p_{пр} – p_{вит} = - 0,785 – (-3,92) = 3,135 \text{ Па} \quad (4.7)$$

Встановлюємо втрату тиску в приточних пройомах, беручи що на пересилення їх спротиву витратимо 20% розрахункової різниці тисків:

$$\Delta p_{пр} = 0,2 \, \Delta p = 0,2 \cdot 3,135 = 0,627 \text{ Па} \quad (4.8)$$

Встановлюємо тиск в цеху $p_\chi$:

$$P_\chi = p_{пр} – \Delta p_{пр} = - 0,785 – 0,627 = - 1,412 \text{ Па} \quad (4.9)$$

Встановлюємо площу відкриття вікон нижнього ярусу:

$$F_{пр} = \frac{G_{пр}}{3600\sqrt{\frac{2p_н(p_{пр} - p_\chi)}{\xi_{пр}}}} = \frac{197 \cdot 10^3}{3600\sqrt{\frac{2 \cdot 1,205(-0,785 - (-1,412))}{3,2}}} = 80 \text{ м}^2 \quad (4.10)$$

Встановлюємо площу фрамуг ліхтаря, що відкриваються:

$$F_{вит} = \frac{G_{вих}}{3600\sqrt{\frac{2p_{вих}(p_{вит} - p_\chi)}{\xi_{вит}}}} = \frac{197 \cdot 10^3}{3600\sqrt{\frac{2 \cdot 1,15(-3,92 - (-1,412))}{3,7}}} = 43 \text{м}^2 \quad (4.11)$$

Висновок: Тиск в цеху $P_х$=1,412 Па, площа вікон, що відкриваються $F_{пр}$ = 80м², площа фрамуг ліхтаря, що відкриваються $F_{вит}$ = 43м².

# ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено дослідження в'язкості шлаків, що використовуються при виробництві інструментальних швидкорізальних сталей шляхом електрошлакового переплаву (ЕШП).

За результатами роботи сформульовано наступні висновки:

- Цех електрошлакового переплаву складається з трьох основних ділянок: пічної, допоміжної та ділянки ад'юстажу. У цеху передбачено встановлення такого обладнання: шість печей ЕШП У-436, чотири флюсоплавильні печі У-360М, два обдирні верстати 9340А, два стрічково-відрізні верстати LKG 425/50, один правильний прес, два транспортувальні візки та інше необхідне устаткування.

- Для забезпечення ефективної роботи цеху важливо передбачити основне і допоміжне обладнання, яке відповідатиме низці вимог, серед яких: технологічна відповідність виробничому процесу, висока продуктивність, оптимальні техніко-економічні показники, надійність і безвідмовність роботи, можливість автоматизації, безпечність обслуговування та експлуатації.

- Використання технології ЕШП дозволяє вирішувати завдання отримання високоякісної сталі зі зниженим вмістом сірки, фосфору та інших небажаних домішок. Така сталь придатна для експлуатації в складних умовах.

- Комплексне застосування відповідного обладнання разом із запропонованою схемою плавлення сталі й точне дотримання технології забезпечують отримання продукції високої якості. Вона характеризується високою хімічною та структурною однорідністю металу, низьким рівнем домішок і газів, що водночас гарантує безпечність для персоналу цеху та зменшення впливу на довкілля. Проєктований цех і обрана технологічна схема є досить гнучкими, що дозволяє при мінімальних додаткових інвестиціях модернізувати обладнання та легко впроваджувати нові технології у виробничий процес.

- Для визначення в'язкості шлаків проведено експериментальні дослідження за допомогою високотемпературної вібровіскозиметрії. Отримані дані було

зіставлено з теоретичними розрахунками, виконаними на основі різних модельних підходів до вивчення властивостей рідких шлаків.

# ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ


1 Гаврилко С. О. Основи проектування металургійних цехів : конспект лекцій. Запоріжжя: ЗДІА, 2006р. 92с.

2 Ланташ Ю. В., Мятях В. Н. Современные способы праизводства стали особовысокого качества : учебное пособие. Киев : Наукова думка, 1987г. 334 с.

3 Харлашин П. С., Кірюшкін Ю. І., Чорнуха О. Є. Дослідження фізико-хімічних характеристик шлакоутворювальних сумішей з метою оптимізації їх складів. *Вісник ПДТУ.* 1998. №6. С. 15-20.

4 Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник для металург. спец. вищ. навч. закл. / Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський [та ін.] ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.

5 Смірнов О. М., Макуров С. Л., Сафонов В. М. Виробництво зливків сталі та промислових сплавів : навч. посіб. Донецьк : Ноулідж, 2013. 405 с.

6 Смирнов В. О., Білецький В. С. Фізичні та хімічні основи виробництва. Київ : Наука, 2005. С. 45−48.

7 Сталеплавильне виробництво: навч. посіб. / В.І. Баптизманський та ін.]. Київ : ФЗМН, 1996. 400 с.

8 Сборник технологических инструкций по выплавке стали в открытой дуговой печи. Запорожье : ОАО «Днепроспецсталь», 2004. 245 с.

9 Електрометалург: колективний договір. Запоріжжя : ВАТ «ДСС». 2000. №2.

10 Нормативи використання енергоресурсів №018. Запоріжжя : ВАТ «ДСС» 1999. 40с.

11 Збірник технологічних інструкцій про розливання сталі. Запоріжжя : ВАТ Дніпроспецсталь, 1999. 253с.

12 Пеккер О. М., Мінаєв В. І. Модернізація промислових печей. Київ : Техніка, 1987. 182с.

13 Комов І. Г. Охорона праці чорної металургії. Київ : Техніка, 1986. 192с.

14 Гапоненко О. Д., Савостін Д. З. Правила безпеки для підприємств та організацій металургійної промисловості. Дніпропетровськ : Промінь, 1970. 352с.

15 Краснов Л. М. Охорона праці. Дніпропетровськ : Промінь 1981. 190с.

16 Державні санітарні правила "Підприємства чорної металургії" ДСП 3.3.1.038-99.

17 Наказ МОЗ від 14.07.2020 № 1596 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони».

18 ДСТУ 2867-94 Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги.

19 ГОСТ 12.1.012-90. ССБТ. Вібраційна безпека. Загальні вимоги.

20 ДСТУ 3038-95 Гігієна. Терміни та визначення основних понять.

21 ДСТУ ГОСТ 12.4.221:2004 Система стандартів безпеки праці. Одяг спеціальний для захисту від підвищених температур теплового випромінювання, конвективної теплоти. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 12.4.221-2002, IDT).

22 НПАОП 40.1-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок (ДНАОП 1.1.10-1.01-97).

23 СНиП 2.01.02-85*. Протипожежні норми (Діє ДБН В 1.1-7-2002) ( 2.01.02-85*).

24 ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.

25 ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування.