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 **Виробництво та використання монолітних низькоцементних глиноземомагнезіальних бетонів у футеруванні сталерозливних ковшів**

Виконав: студент IV курсу, групи 6.1362-м-с2
спеціальності 136 Металургія
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Металургія
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
М.М.Ковтун
(ініціали та прізвище)

Керівник доц., к.т.н, доц. Воляр Р.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент проф., д.т.н., проф. Бєлоконь Ю.О.
(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)

_____Ковтуну Максиму Максимовичу_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Виробництво та використання монолітних низькоцементних глиноземомагнезіальних бетонів у футеруванні сталерозливних ковшів
керівник роботи _____Воляр Роман Миколайович, к.т.н., доц._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року №1831-с_____

2 Строк подання студентом роботи _____15.06.2026_____

3 Вихідні дані до роботи __ Дослідити процес виробництва та використання монолітних низькоцементних глиноземомагнезіальних бетонів у футеруванні сталерозливних ковшів. Визначення закономірностей сучасних технологій виробництва вогнетривких бетонів. Науково-технічна література, авторські свідоцтва

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)
12 креслень_____

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Загальна частина	Воляр Р.М., доцент		
2 Конструкційна частина	Воляр Р.М., доцент		
3 Технологічна частина	Воляр Р.М., доцент		
4 Охорона праці та техногенна безпека	Воляр Р.М., доцент		

7 Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ, реферат	11.05-15.05.2026	
2	1 Загальна частина	16.05-20.05.2026	
3	2 Конструкційна частина	21.05-27.05.2026	
4	3 Технологічна частина	28.05-06.06.2026	
5	4 Охорона праці та техногенна безпека	07.06-11.06.2026	
6	Висновки, перелік джерел посилання	12.06-14.06.2026	

Студент _____ _____М.М.Ковтун_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____ _____Р.М.Воляр_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

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

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 87 с., 11 табл., 26 рис., 34 джерела

СТАЛЕРОЗЛИВНИЙ КІВШ, НИЗЬКОЦЕМЕНТНІ ГЛИНОЗЕМОМАГНЕЗІАЛЬНІ БЕТОНИ, ФУТЕРУВАННЯ, ГОРІННЯ, СУШІННЯ, В'ЯЖУЧІ

Мета роботи – дослідити процес виробництва та використання монолітних низькоцементних глиноземомагнезіальних бетонів у футеруванні сталерозливних ковшів.

В загальній частині наведена загальна характеристика виробництва ПрАТ «Дніпроспецсталь» та характеристика сталеплавильного виробництва.

В конструкційній частині представлена загальна характеристика парку сталерозливних ковшів ПрАТ «Дніпроспецсталь».

В технологічній частин досліджено використання монолітних низькоцементних глиноземомагнезіальних бетонів у футеруванні сталерозливних ківшів; проведений розрахунок горіння природного газу в процесах сушіння ковшів; запропонована технологія та устаткування високотемпературної експлуатації футерування сталерозливальних ковшів; досліджені магнезіальні вогнетривкі бетони на основі лужних в'язких з підвищеними термомеханічними властивостями; досліджені фазові склади та властивості низькоцементних магнезіальних бетонів.

В розділі «Охорона праці та техногенна безпека» дається характеристика шкідливих умов виробництва вогнетривких матеріалів, санітарно-гігієнічних умов праці та визначаються заходи, що забезпечують комфортні умови праці, вимоги техніки безпеки, плануються протипожежні заходи.

ЗМІСТ

Вступ 6
1 Загальна частина 7
1.1 Схема виробництва ПрАТ «Дніпроспецсталь» 9
1.2 Характеристика сталеплавильного виробництва 9
2 Конструкційна частина 19
2.1 Загальна характеристика парку сталерозливних ковшів 19
3 Технологічна частина 23
3.1 Монолітні низькоцементні глиноземомагнезіальні
бетони у футеруванні сталерозливних ківшах 23
3.2 Розрахунок горіння природного газу в процесах сушіння ковшів 40
3.3 Технологія та устаткування високотемпературної експлуатації футерування
сталерозливальних ковшів 50
3.4 Магнезіальні вогнетривкі бетони на основі
лужних в'язких з підвищеними термомеханічними властивостями 62
3.4.1 Дослідження властивостей в'яжучих 65
3.4.2 Дослідження властивостей магнезіальних бетонів 67
3.5 Дослідження фазового складу
та властивостей низькоцементних магнезіальних бетонів 69
4 Охорона праці та техногенна безпека 72
4.1 Загальні вимоги щодо створення безпечних умов праці 72
4.2 Утворення шкідливих речовин та чинників при технологічних процесах
виробництва 73
4.3 Заходи з пожежної безпеки 78
4.4 Заходи з електробезпеки 79
4.5 Заходи безпеки в аварійних ситуаціях 80
4.6 Висновки 81
Висновки 83
Перелік джерел посилання 85

ВСТУП

Чорна металургія є основним споживачем вогнетривких матеріалів, використовуючи 60–75% від їх загальної кількості. З цієї частки близько 70–75% вогнетривів витрачається під час виплавки сталі. Обсяги виробництва і споживання вогнетривів оцінюються за показником витрати на тонну сталі у злитках, що вимірюється в кілограмах. У загальній собівартості сталі в злитках частка вогнетривких матеріалів становить приблизно 3%.

Вогнетриви є незамінними для обмеження поширення тепла в навколишнє середовище та забезпечення тривалого підтримання високих температур у значних обсягах. У цьому випадку вони виконують роль високотемпературних теплоізоляційних матеріалів. Збільшення часу перебування металу в ковші негативно впливає на облицювання ковша, тому пріоритет віддається ефективним ковшовим вогнетривам, серед яких популярними є периклазові та високоглиноземисті матеріали. Однак традиційні склади та методи виготовлення вогнетривких футеровок уже не відповідають сучасним вимогам, особливо якщо мета полягає в досягненні високоякісної сталі. Це стимулює упровадження нових типів вогнетривів із підвищеною стійкістю.

Сучасні покоління вогнетривких матеріалів створюються на основі синтезованих систем: оксидних (наприклад, MgO-CaO-ZrO_2-C) і оксидно-безкисневих; периклазових (MgO), периклазовапняних (MgO-CaO), периклазо-вапняноцирконієвих (MgO-CaO-ZrO_2), шпінельних, периклазошпінельних із добавками вуглецю чи без нього, мулітовуглецевих, корундових, цирконієвих та цирконвуглецевих.

На сучасному етапі у світовій практиці ковшової металургії (зокрема у США, Німеччині, Австрії, Японії, Китаї, Індії, Бразилії) усе більше значення мають неформовані монолітні вогнетриви, зокрема наливні бетони. У Японії частка таких матеріалів досягає 55–60%. Особливо популярними стали низькоцементні вогнетривкі бетони (НЦВБ) нового покоління, виготовлені на основі різноманітної сировини: табулярного глинозему, плавленого корунду, периклазу, алюмомагнезіальних шпінелів і алюмосилікатів.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Приватне акціонерне товариство «Металургійний завод «Дніпроспецсталь» є одним із провідних металургійних підприємств України, спеціалізуючись на виробництві жароміцних і прецизійних сплавів, а також нержавіючих, підшипникових, інструментальних і легованих конструкційних сталей.

У технологічному процесі виробництва широко застосовуються сучасні методи, такі як електрошлаковий і вакуумно-дуговий переплав, виготовлення сталі за технологією порошкової металургії, аргоно-кисневе рафінування нержавіючих сталей, обробка металу на установці «піч-ківш» і вакуумування рідкої сталі. Такий підхід гарантує отримання високоякісного металу з покращеними технічними характеристиками.

За час функціонування заводу освоєно виробництво понад 800 марок сталі і понад 1000 профільних розмірів сортового прокату. Високий рівень технологій і якість продукції підприємства підтверджувались численними сертифікатами товариства технічного нагляду з Німеччини.

На сьогодні «Дніпроспецсталь» пропонує продукцію, яка відповідає міжнародним стандартам якості:

- прокат круглого, квадратного та смугового перерізів (8–350 мм);
- трапецієподібний профіль для дорожніх шайб (8,9 х 9,9 мм);
- осьова заготівля для вагонних осей магістральних доріг;
- гальмівна шина (25 х 65 х 129 мм);
- рівнополочний куточок (40 х 40 х 5 мм);
- шестигранник (17–30 мм);
- пресові поковки круглого, квадратного та смугового перерізу (190–550 мм);
- шайби (140–300 х 500–1000 мм);
- холоднотягнута сталь (10–40 мм);
- сталь зі спеціальним оздобленням поверхні (2–12 мм);

- ресорна сталь із параболічними кромками (45 х 6, 45 х 6,5 мм); - калібрований холоднотягнутий дріт (2–6 мм);

- спіральні свердла з циліндричним хвостовиком із швидкорізальної сталі діаметром 2–12 мм.

А також великий вибір товарів широкого вжитку. ПрАТ "Електрометалургійний завод "Дніпроспецсталь" є провідним підприємством України з виробництва якісної сталі та сплавів. Початок його історії бере свій відлік з 10 жовтня 1932 року, коли була здійснена перша плавка електросталі. Вже у передвоєнний період завод досягнув проектної потужності. У роки Другої світової війни виробництво було евакуйовано до Сибіру.

Відновлення заводу у Запоріжжі завершилося тим, що у жовтні 1948 року тут відлили першу післявоєнну плавку сталі. У подальші роки, враховуючи зростаючі вимоги до якості продукції для машинобудування, хімічної промисловості та ракетобудування, завод освоїв технології виробництва електрошлакового та вакуумно-дугового металу, виготовлення великогабаритних поковок методом вільного кування на пресах, холоднотягнутої (каліброваної) сталі, газокисневе рафінування нержавіючої сталі, а також впровадив методи порошкової металургії й сучасну обробку металу. За роки своєї діяльності підприємство опанувало більше 800 марок сталі та понад 1000 профілей прокату, забезпечуючи найвищу якість продукції, що відповідає вимогам як вітчизняних, так і зарубіжних споживачів.

Завод постійно враховує тенденції світового ринку, регулярно коригуючи свої виробничі плани та розширюючи асортимент продукції. Для підтримки конкурентного рівня виробництва і підвищення якості продукції ведеться систематична робота з модернізації сталеплавильних і прокатних цехів. Планується заміна наявних електросталеплавильних печей на сучасні установки нового покоління, впровадження агрегатів позапічної обробки сталі, а також заміна застарілих дрібносортних станів на сучасні лінії з підвищеною жорсткістю клітей.



Рисунок 1.1 – Загальна панорама ПрАТ «Дніпроспецсталь»

Вигідне географічне розташування та добре розвинена транспортна інфраструктура забезпечують ефективну діяльність заводу.

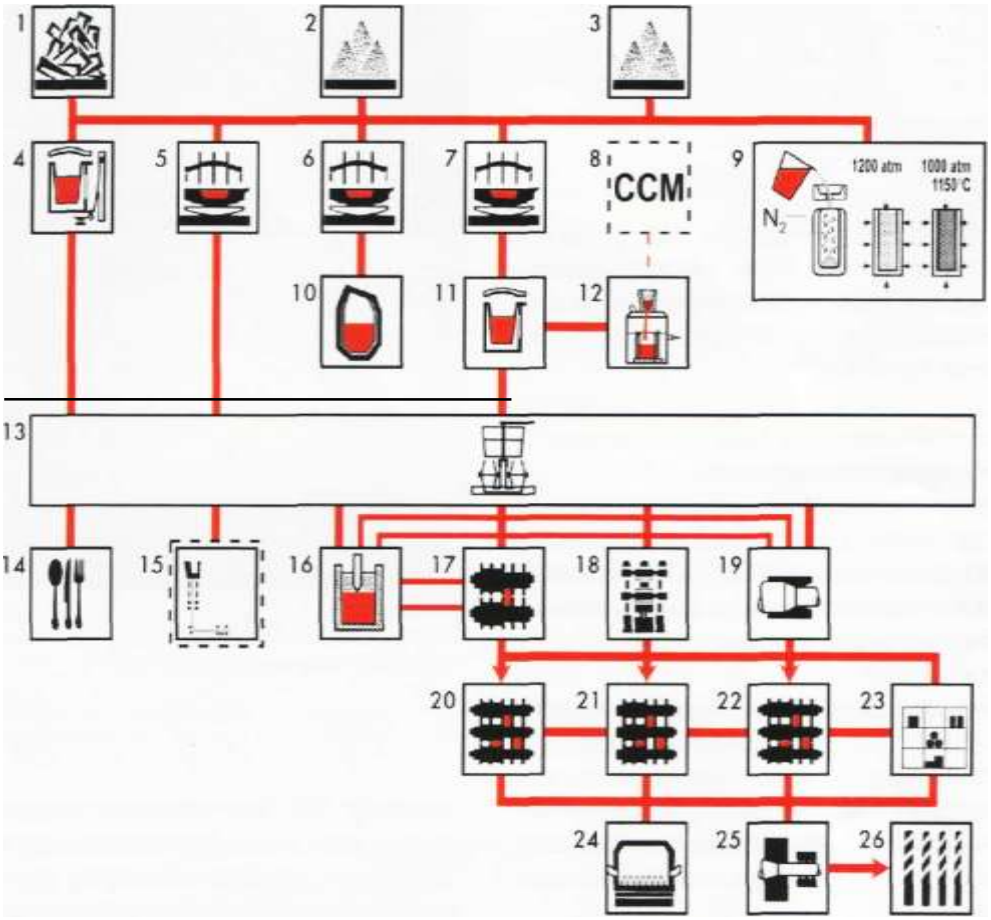
1.1 Схема виробництва ПрАТ «Дніпроспецсталь»

На рисунку 1.1 зображено загальну схему виробничого процесу ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» — одного з провідних підприємств України, яке спеціалізується на випуску високоякісної сталі та сплавів. Усі процеси здійснюються на базі заводу «Дніпроспецсталь».

1.2 Характеристика сталеплавильного виробництва

Сталеплавильне виробництво ПрАТ «Дніпроспецсталь» включає два електросталеплавильні цехи, обладнані дуговими печами з об’ємом від 10 до 60 тонн, та одну індукційну установку на 10 тонн. Обидва цехи орієнтовані на виплавку різноманітних груп сталей, забезпечуючи широкий спектр продукції.

Зокрема, сталеплавильний цех №1 (СПЦ-1) раніше був спеціалізований на виробництві швидкорізальних сталей, жароміцних сплавів, а також найбільш технічно складних конструкційно-легованих і інструментальних сталей. Наразі основним напрямом діяльності цеху є виготовлення жароміцних сплавів.



1 - Скрапорозділ; 2 - Підготовка сирих матеріалів; 3 – Феросплави; 4 - ЕСПЦ №1 (індукційна піч); 5 - ЕСПЦ №1 (дугова піч); 6 - ЕСПЦ №2 (дугова піч); 7 - ЕСПЦ №3 (дугова піч); 8 – МБЛЗ; 9 - Виробництво інструментальної сталі методом порошкової металургії; 10 - Агрегат газокисневого рафінування; 11 - Установка "піч-ківш"; 12 – Вакууматор; 13 - Розливання: у сортові зливки вагою 1.0 т; 3,5 т; 4.3 т; 5,8 т; 7.4 т; листові 10 – 13 т; 9 – 13 т; 14 - Виробництво столових приладів; 15 - Напівбезперервне розливання сталі; 16 - Електрошлаковий (ЕШП) та вакуумно-дуговий (ВДП) переплав; 17 – Блюмінг; 18 - Кування на пресах; 19 - Механізоване кування на молотах та радіально-кувальних машинах (РКМ); 20 - Сортопрокатний стан "550"; 21 - Сортопрокатний стан "325"; 22 - Сортопрокатний стан "280"; 23 - Склад готової продукції; 24 - Термічна обробка; 25 - Калібрувальний цех; 26 - Цех виготовлення свердл

Рисунок 1.1 – Схема виробництва

ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь»

Розливання сталі проводиться у зливки масою 1,2, 3,6 та 4,5 тонни. У цеху наявна установка напівбезперервного розливання сталі, яка використовується для виготовлення електродів з перерізом 370 х 370 мм для електрошлакового переплаву, а також круглих електродів діаметром 405 мм для вакуумно-дугового переплаву. Окрім цього, в цеху встановлений пароежекторний вакууматор.



Рисунок 1.2 – Випуск сталі із електропечі

Після полірування сталі в ковші її розливають у виливниці об'ємом від 1 до 5 тонн. Така малотоннажність обумовлена необхідністю забезпечити утворення дрібнозернистої структури сталі під час кристалізації. Це дозволяє уповільнити зростання деревоподібних кристалів і сприяє формуванню дрібніших стовпчастих кристалів.

Електросталеплавильний цех №2 спеціалізується на виробництві різних марок нержавіючих сталей. Для обробки нержавіючих сталей методом аргонно-кисневого продування (УОД) в цеху встановлено конвертер. Виробничий процес забезпечують чотири електродугові печі ємністю по 60 тонн, обладнані газоочисними системами з рукавними фільтрами. Окрім цього, цех займається відливанням листових зливків для комбінату "Запоріжсталь". Виробництво нержавіючих корозійностійких сталей із низьким вмістом вуглецю здійснюється із застосуванням газокисневого конвертера.

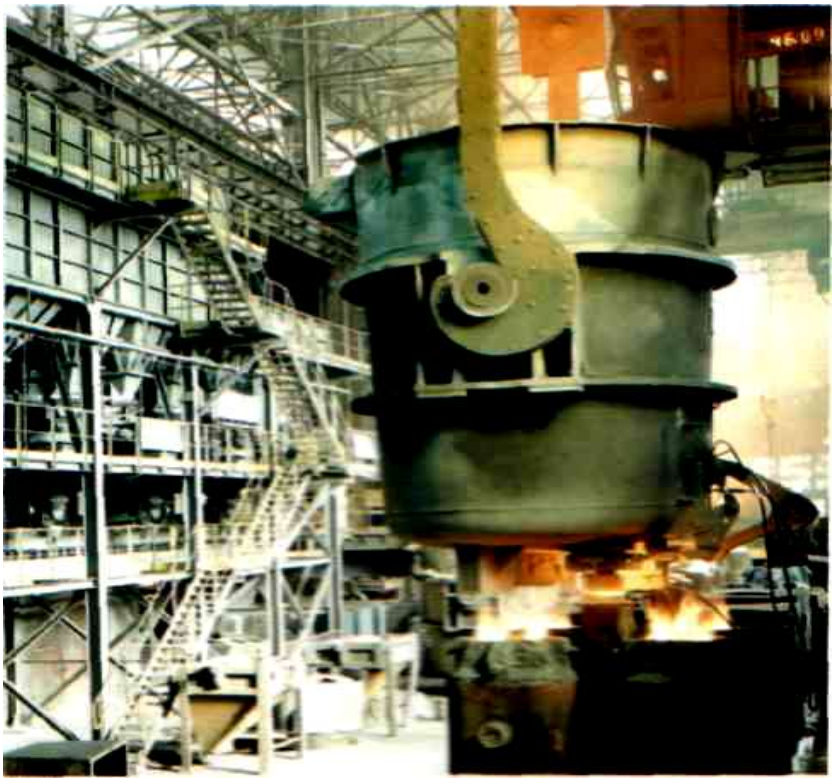


Рисунок 1.3 – Сталерозливний ківш (розливання стали у виливниці)



Рисунок 1.4 – Установка піч-ківш

Електросталеплавильний цех №3 призначений для виплавки спеціалізованих марок сталі, зокрема підшипникової, ресорно-пружинної, легованої конструкційної, а також вуглецевої інструментальної та конструкційної сталі.

У виробничому процесі використовуються сім електродугових печей місткістю 60 тонн кожна. Гарантія високої якості отримуваної сталі, дотримання вузьких меж хімічного складу та стандартних характеристик досягається завдяки додатковій обробці напівпродукту. Спочатку він плавиться у відкритій дуговій печі, а потім проходить обробку на технологічній установці "піч-ківш" (Рис. 1.4) та вакуумування на обладнанні, виготовленому німецькою компанією "Маннесманн-Демаг".



Рисунок 1.5 – Вакууматор

У цеху електрошлакового та вакуумно-дугового переплаву (ЕШП, ВДП) встановлено печі різної місткості, призначені для виконання відповідних технологічних процесів. Тут формуються сортові зливки вагою 3,5–4,5 тонни, листові зливки вагою до 20 тонн, а також вакуумні зливки масою 3,5 та 6,5 тонни.

Вакуумні зливки проходять обробку в ковальсько-пресовому цеху, а електрошлакові сортові зливки направляються на блюмінг. Листові зливки прокочуються в комбінаті «Азовсталь», де з них виробляють товсті суднобудівні листи.

За допомогою технології вакуумно-дугового переплаву, представленої на рисунку 1.6, освоєно виробництво біметалічних зливків, які поєднують властивості вуглецевої та нержавіючої сталі. З таких біметалічних зливків виготовляють заготовки для трубної продукції.



Рисунок 1.6 – Печі електрошлакового переплаву (ЕШП)

Цех з виробництва швидкорізальної сталі методом порошкової металургії був введений в експлуатацію у 1980 році. У процесі виробництва

використовуються методи холодного ізостатичного пресування, а потім гарячого пресування в газостаті при температурі 1100–1150°С і тиску 1000 атм. Такі технології дозволяють отримувати метал з однорідною структурою без утворення карбідної сітки. У цеху також освоєно процес виробництва круглих злитків діаметром 500 мм і масою 2 тонни шляхом індукційного плавлення із наступним пресуванням.

Асортимент продукції включає поковки круглого перерізу діаметром 80–350 мм і довжиною 2–5 м, а також металопрокат діаметром 20–70 мм. Окрім цього, є можливість реалізовувати товарний порошок різних марок сталі.



Рисунок 1.7 – Швидкоріз отриманий порошковим методом

У цеху порошкової металургії метали та їх сплави виробляють за допомогою спеціальної колони, в якій метал або сплав розпилюють у захисному середовищі. Далі матеріал проходить такі етапи, як газостатичне стиснення та інші технологічні процеси.

Приватне акціонерне товариство "Завод Дніпроспецсталь" спеціалізується на виготовленні прокату, поковок, холоднотягнутої сталі та сталі з особливим

оздобленням поверхні.

На обтискно-заготівельному стані серії "950"/"1050" здійснюється прокатка злитків масою від 2.8 до 4.5 тонн, які подаються в гарячому або холодному стані. Ці заготовки використовують для виробництва сортових станів, а також для сортового прокату діаметром від 130 до 250 мм.

На сортових станах моделей "550", "325" та "280" за високопродуктивними схемами й оптимальними калібрувальними рішеннями виготовляється широкий асортимент прокату. До переліку продукції входять круглий та квадратний профіль діаметром від 8 до 130 мм, а також смуговий переріз, зокрема із параболічною кромкою.

Фінальне оброблення металу на ад'юстажних дільницях здійснюється повністю механізовано за допомогою агрегатних ліній та високопродуктивних верстатів.



Рисунок 1.8 – Готова продукція після ад'юстажу

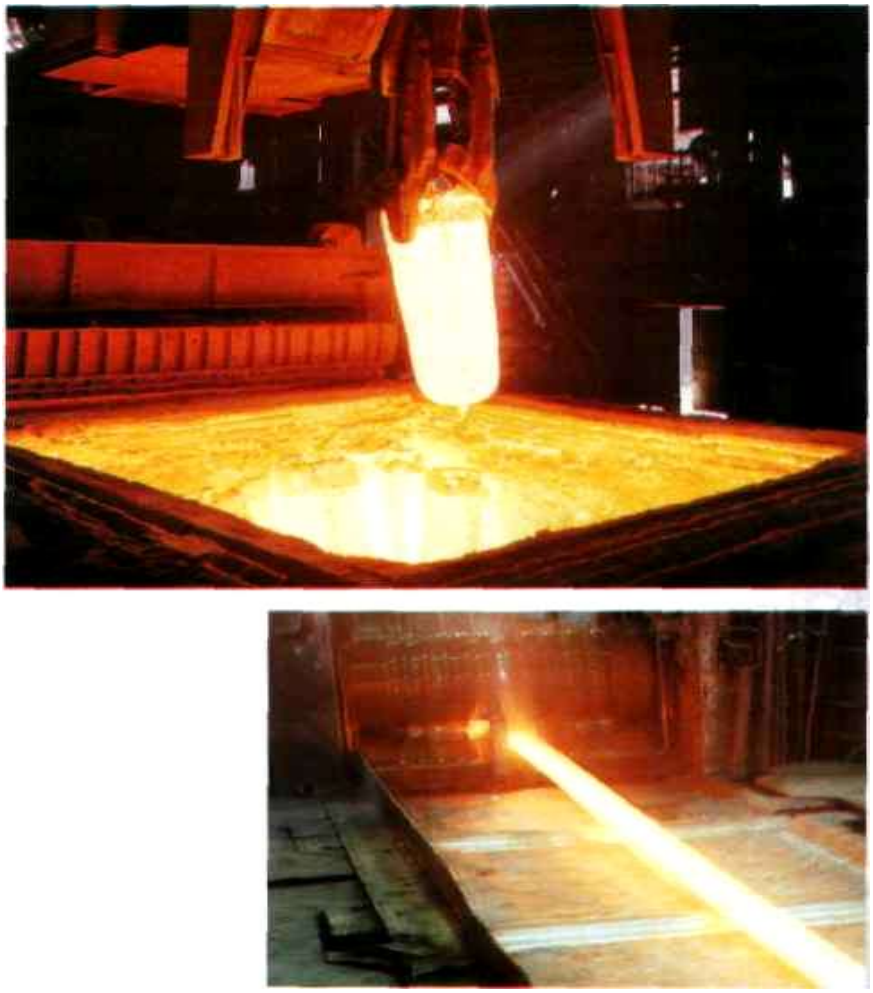


Рисунок 1.9 – Підготовка до прокатування на станах



Рисунок 1.10 – Прес зусиллям 60МН

Ковальсько-пресовий цех оснащений гідравлічними пресами з номінальним зусиллям 60 і 32 МН. До складу обладнання входять маніпулятори вантажопідйомністю 10 та 5 тонн відповідно. У цеху також передбачені ділянки для проведення термічної обробки, механічної обробки поковок та ультразвукового контролю за допомогою сучасних приладів.

Продукція, що виготовляється, включає поковки круглого і квадратного перерізу розміром від 200 до 500 мм, сляби розміром 120-300 × 300-800 мм, а також шайби діаметром 400-1100 мм. Матеріалами для виготовлення є конструкційні, інструментальні, корозійностійкі, нержавіючі сталі, прецизійні сталі та сплави.

Цех успішно освоїв технологію кування довгомірних валів великого діаметру в діапазоні 400-450 мм.

2 КОНСТРУКЦІЙНА ЧАСТИНА

2.1 Загальна характеристика парку сталерозливних ковшів

Ковші є невіддільною складовою основного металургійного обладнання, що застосовується для прийому, підготовки, транспортування, обробки сталі в ковші та розливу розплавленого металу (рис. 2.1). Залежно від конструкції ковші класифікують за кількома ознаками. За способом транспортування розрізняють ручні, монорейкові та кранові ковші. За методом розливу сталі – з верхнім розливом (через носик) та з нижнім розливом, який може виконуватися за допомогою стопорних або ковзних затворів. За конструкцією ковші поділяються на конічні, барабанні, чайникові та секторні. Основні експлуатаційні характеристики ковшів включають їхню ємність і коефіцієнт тари. Ємністю ковша називають масу рідкої сталі разом зі шлаком, яку можна вмістити до рівня нижньої кромки зливного носика.

Надійність ковшів, яка є важливою умовою безперебійної роботи сталерозливних цехів, великою мірою залежить від стійкості футерування з вогнетривких матеріалів і розливного пристрою. Геометричні розміри ковшів повинні бути достатньо великими для вміщення всієї розплавленої сталі та частини шлаку, що утворюється під час плавки. Кількість шлаку визначають розрахунково для кожної конкретної ємності з урахуванням втрат тепла та тривалості процесу розливання. Для ковшів великої місткості відносна частка шлаку становить 2,6–5,7%.

Сталерозливний ківш є сталевим клепаним або зварним посудом, футерованим зсередини вогнетривкими матеріалами та обладнаним пристроями для транспортування й розливання сталі [1]. Конструкція ковшів варіюється залежно від їхньої ємності, що пов’язано з технічними вимогами виробництва та умовами експлуатації. Номінальна ємність сталерозливних ковшів у діапазоні від 1 до 480 тонн встановлена згідно з ГОСТ 7358-78. Ковші місткістю до 70 тонн вважаються малими, тоді як місткість понад 220 тонн

відповідає великовантажним ківшам.

Кожух ковша має конусність у межах 1:12–1:17 і виготовляється з трьох обичайок: верхньої, середньої та нижньої. На верхній обичайці приварюють кільце жорсткості та передбачають конструктивні вирізи для носика й отвори для кріпильних болтів. Середня обичайка містить цапфовий пояс із двома ребрами жорсткості, цапфовими плитами та цапфами. Цапфи забезпечені міцними заплечиками та зовнішніми запобіжними шайбами, вони запресовуються з внутрішнього боку обичайки. Для днища ковша зазвичай використовують опуклу конструкцію – коробову або побудовану на основі еліптичної кривої. У разі еліптичного днища велика піввісь еліпса дорівнює радіусу днища, а мала піввісь – висоті днища.

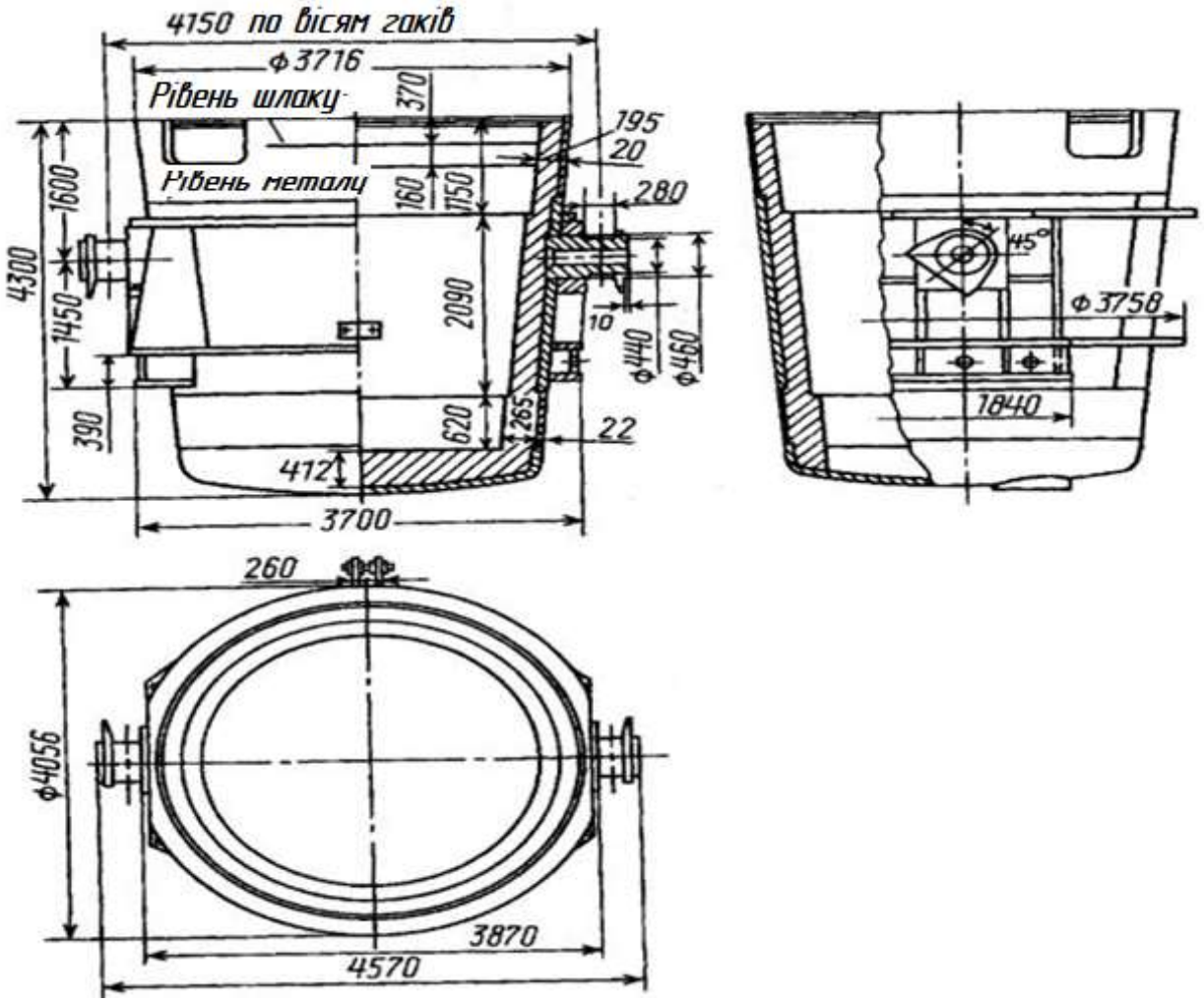


Рисунок 2.1 – Технічні характеристики сталерозливного ковша

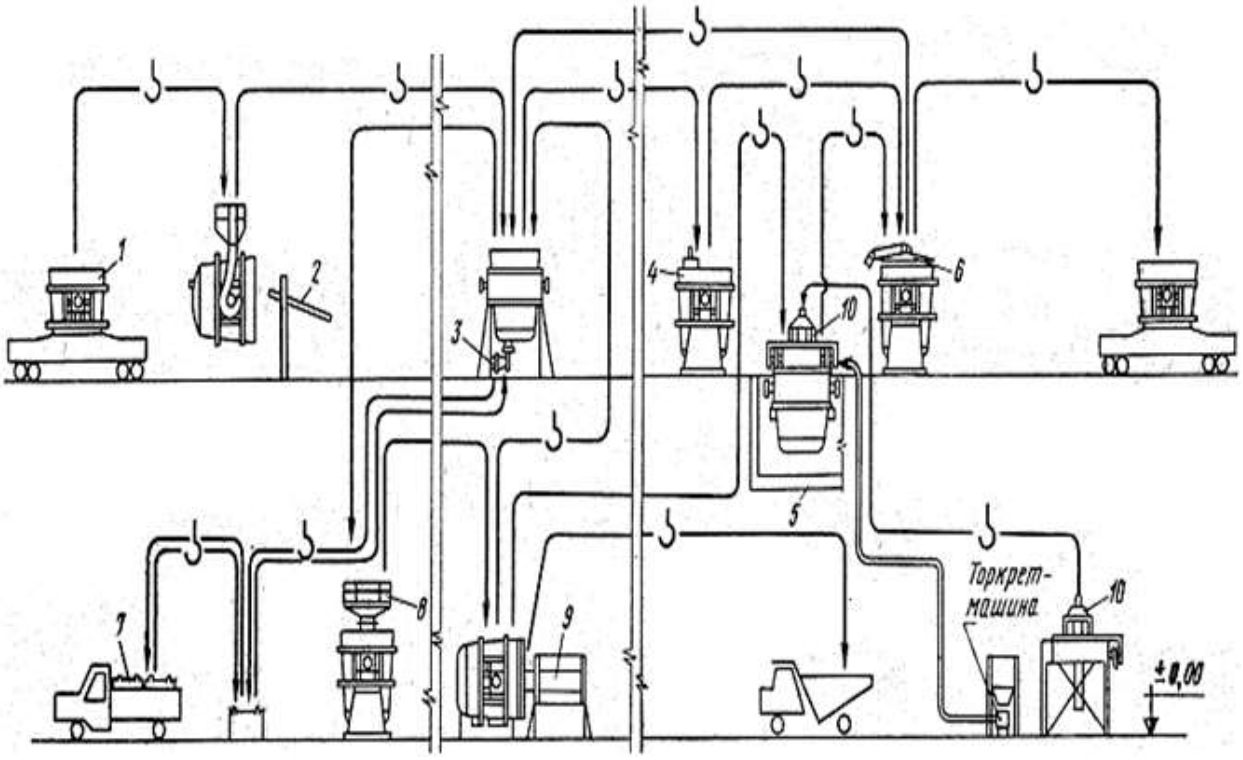
Коробчасті днища набули широкого застосування завдяки простоті

виготовлення. Їх конструкція передбачає сполучення сферичних поверхонь із двома різними радіусами, причому менший радіус відповідає кільцевій частині у місці переходу до стінок ковша. На такому днищі передбачено два отвори, які використовуються для встановлення скляних розливів. Навколо цих отворів наварюють накладки, розмір яких перевищує діаметр отворів у 3–4 рази. Осі отворів для випуску сталі розташовуються зі зміщенням від центральної осі ковша, щоб струмінь сталі, що надходить із плавильного агрегату (печі), не потрапляв на регулюючі сталерозливні затвори. Додатково, у кожусі ковша висвердлюють випарні отвори діаметром 10–12 мм з кроком 300–400 мм, що дозволяють виводити пари води під час сушіння футеровки.

У процесі експлуатації кожух ковша зазнає деформації: радіус ковша між цапфами зменшується, а в поперечному напрямку збільшується, що може призводити до різниці діаметрів перевищенням 200 мм і більше. Такі деформації ускладнюють виконання футеровки, особливо монолітної. Для зниження рівня деформації на кожусі встановлюють додаткові ребра жорсткості й посилюють верхній фланець. Отвори діаметром 10–20 мм і кроком 300–400 мм використовуються для виходу пар води при сушінні футеровки. Шлаковий жолоб служить для видалення надлишків шлаку, який часто потрапляє у великих кількостях під час зливу металу з мартенівських або двованних печей.

Експлуатаційні умови вогнетривкої футеровки сталерозливних ковшів залежать від технології виробництва сталі, асортименту виплавленої продукції та коефіцієнта використання основного металургійного обладнання. Інтенсивність дії чинників, що викликають пошкодження вогнетривів, визначається саме цими умовами. Наприклад, товщина шару шлаку інколи досягає 300 мм і більше, що значно прискорює руйнування футеровки в зоні шлакового поясу. Температура металу під час зливу в ківш впливає на активність всіх руйнівних факторів, перш за все хімічних реакцій. Футеровка ковша стикається із феростатичним тиском, який сприяє проникненню металу в пори й тріщини матеріалу. Рух розплавленого металу при його зливі та

розливанні викликає ерозію футеровки. Нерегулярний режим роботи ковша призводить до різких змін температури (нагрівання та охолодження), які також негативно впливають на стан вогнетривкої футеровки. Крім того, механічні пошкодження футеровки можуть виникати при її очищенні від залишків металу чи шлаку.



1 – ківш; 2 - пристрій для обробки ковша; маніпулятор для встановлення шиберних затворів; 4 – кесон для засипання склянок та ущільнення гнізда; 5 – яма для ремонту ковшів; 6 – пристрій для сушіння; 7 – контейнер для шиберних затворів; 8 - пристрій для охолодження; 9 - машина для видалення застиглого металу; 10 - пристрої для торкретування ковша

Рисунок 2.2 – Схема підготовки сталерозливного ковша до плавки

З врахуванням зазначених умов експлуатації ковшів, формулюється низка вимог до робочих характеристик вогнетривких матеріалів. Серед них - висока стійкість до ерозійного впливу розплавленого металу і шлаку, достатній рівень термостійкості, а також відсутність хімічної взаємодії з реагентами, що додаються в метал. Ці вимоги успішно задовольняє глиноземомагнезіальний вогнетривкий бетон.

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Монолітні низькоцементні глиноземомагнезіальні бетони у футеруванні сталерозливних ківшах

Корундові бетони, виготовлені з плавленого та спеченого глинозему, почали активно розроблятися у 60-х роках минулого століття. Спочатку вміст високоглиноземистого цементу складав 10-35% від масової частки. Матеріали цього типу демонстрували надзвичайно високу міцність після випалювання, а також зналися на ерозійній і абразивній стійкості. Крім того, вони мали чудову металостійкість, що зробило їх популярними у промисловій сфері.

У 70-х роках було вдосконалено технологію шляхом збільшення кількості дрібних фракцій у складі бетонів для забезпечення щільнішого пакування зерен за рахунок оптимізації фракційного складу. Одночасно, впровадження у 60-х роках реактивного глинозему дало змогу розробити технологію лиття бетонів із регульованою пористістю. Це дозволило знизити кількість води при замішуванні до показника нижче 8%. У результаті теплостійкість матеріалу при температурі 1400°C склала 12-16 МПа, що перевищувало міцність найкращих формованих корундових виробів на основі мулітових зв'язок.

Протягом 70-80-х років розпочали розробку бетонів із низьким та ультранизьким вмістом цементу, що спричинило зменшення кількості води замішування до всього 4%. Це відкрило можливість для застосування технології вібролиття, яка значно покращила властивості готових сумішей.

Вогнетривкі бетони — це безвипалювальні композиційні матеріали, які складаються з вогнетривкого заповнювача, сполучних речовин та різноманітних добавок (пластифікаторів, структуроутворювальних агентів, противсадкових компонентів тощо). Їх можна класифікувати за типами затвердіння: гідратаційні в'язкі (на основі глиноземистих, високоглиноземистих, магнезіальних цементів), хімічні й полімеризаційні в'язкі (на основі рідкого скла, фосфатних та сульфатних зв'язків), а також

коагуляційні в'язкі (з використанням глини або бентоніту). У якості наповнювачів використовуються подрібнені вогнетривкі матеріали: корундові, шамотні, високоглиноземисті.

Характеристики вогнетривких бетонів значною мірою залежать від типу доданих сполучних матеріалів, тому дуже важливим є дотримання всіх необхідних умов сушіння і нагрівання футеровки. Щоб краще розуміти процеси зміцнення вогнетривких бетонів на основі глиноземисто-цементного сполучного компонента, варто детально ознайомитися з механізмом твердіння глиноземистого цементу. Основні компоненти останнього наведені на діаграмі системи CaO – Al_2O_3. У ній представлено п'ять видів алюмінату кальцію: $C_{12}A_7$, CA, CA_2 та C_3A_5. Саме ці компоненти визначають ключові властивості глиноземистого цементу.

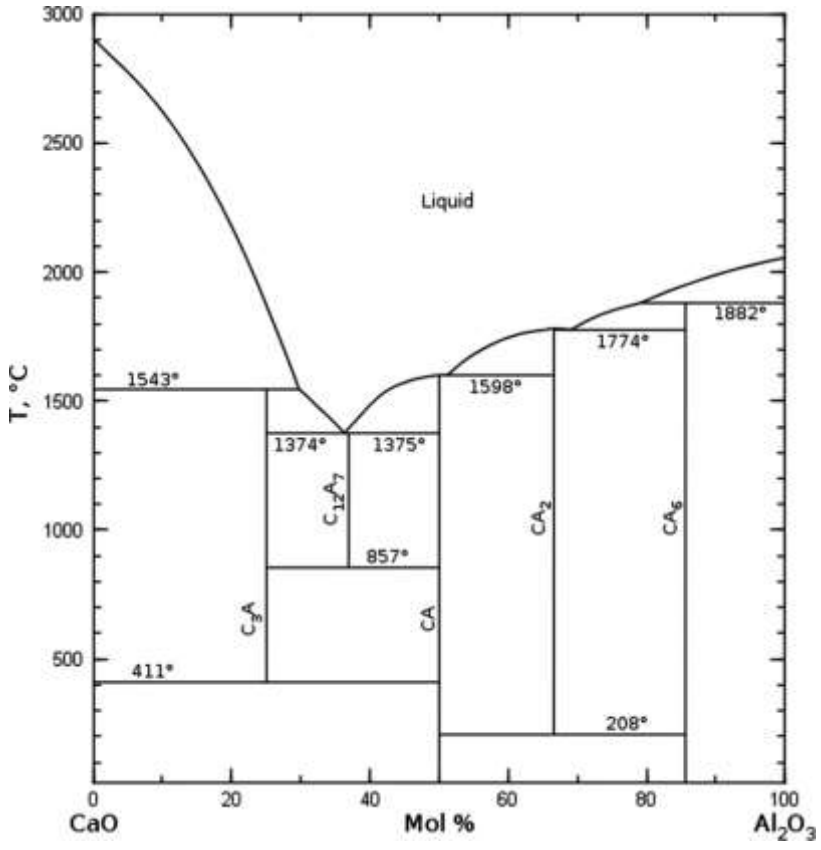


Рисунок 3.1 – Діаграма стану системи CaO-Al_2O_3

У системі CaO–Al_2O_3–H_2O проходить реакція гідратації глиноземистого цементу. Утворення гідратів залежить від температурного режиму та

мінералогічного складу компонентів, зокрема від концентрації вапна.

При температурі близько 300 °C глиноземистий цемент втрачає частину адгезійної води та приблизно 70% кристалізаційної води. Під час нагрівання до 700 °C відзначається виділення до 90% води, хоча для повного її усунення потрібні ще вищі температури. З аналізу температурних кривих та кількісної втрати води видно, що найбільш значний відтік вологи (разом із поглинанням тепла) відбувається при температурі 150 °C. На цьому етапі видаляється адгезійна вода, що призводить до трансформації мінерального складу: CAH_{10} → CH_7 + 3H, а також CH_7 → CA + 7H. Далі спостерігається інша зміна: $3CH_{10}$ → C_3AH_6 + $2AH_3$ + 18H. У цей період голчасті кристали CAH_{10} переходять у зернисту фазу, що обумовлює зниження механічної міцності матеріалу. Зневоднення гіпситу (AH_3) призводить до його трансформації в беміт (AH), а за температури близько 500 °C – у λ-A. При 300 °C також спостерігається істотне зменшення маси й значне теплопоглинання за рахунок реакції $7C_3AH_5$ → $C_{12}H_7$ + 9C + 35H, у якій утворюються γ-A та частина CA. У свою чергу, тепловиділення при 630 °C викликає перетворення γ-A на α-A.

Наведений процес є характерним для затвердіння глиноземистого цементу. Враховуючи особливості цього процесу, необхідно ретельно контролювати температуру схоплювання бетону протягом його твердіння і подальше підвищення температурного режиму.

Основним матеріалом для виготовлення глиноземомагнезіальних бетонів виступають високоглиноземисті складники та шамотна сировина. Як сполучні компоненти використовуються глиноземистий цемент та фосфати. Після укладання у відповідних умовах вогнетривкі бетони набувають необхідної конструкційної форми. На відміну від цегли, під час транспортування таких бетонів небезпека механічних пошкоджень значно зменшена. Також відсутня потреба у трудомістких етапах підготовки, таких як сушіння та випалювання дрібних виробів. Вогнетривкі бетони рекомендується застосовувати для високотемпературних умов експлуатації зі стабільним об'ємом конструкції, коли потрібна висока корозійна стійкість до розплавів або витривалість до

механічних ударів.

Вогнетривкі бетони на глиноземистому цементі часто зазнають пошкоджень через розплавлення наповнювачів, що необхідно враховувати під час виготовлення футеровки та контролю її експлуатації. У цьому контексті цегла має кращу стабільність, оскільки її піддають випалу, утворюючи міцні керамічні з'єднання, які забезпечують довговічність конструкцій. Причина меншої стабільності вогнетривких бетонів полягає у варіативності їх мінералогічного складу та температурному градієнті, що утворюється у стінках печі.

Затвердіння вогнетривкого бетону на глиноземистому цементі відбувається через певний проміжок часу після укладання. Підвищення вмісту глинозему у складі виробів позитивно впливає на механічні властивості, збільшує температуру вогнетривкості та забезпечує хімічну стійкість до розплавлених металів. Однак при високих температурах глинозем вступає у реакцію з оксидами заліза, утворюючи сполуку $FeO{\cdot}Al_2O_3$, а при взаємодії з кремнієвою кислотою – алюмосилікати, або ж із основами – алюмінати. Дані сполуки сприяють зниженню температури вогнетривкості матеріалу.

Хімічна стійкість високоглиноземистих вогнетривких бетонів відносно газоподібних, твердих та розплавлених реагентів при високих температурах має наступну градацію: аморфний глинозем → природний кристалічний (з урахуванням бокситу) → діаспор → штучний корунд. Високоглиноземисті вогнетриви характеризуються підвищеною теплопровідністю й щільністю. Водночас вони можуть демонструвати додаткову усадку при високих температурах, провокуючи утворення настилу або заростання ковшів. Для зменшення цього явища доцільно регулювати фазовий склад матеріалів.

В'яжучими речовинами в складі вогнетривких бетонів є дисперсійна система, яка складається з дисперсійної фази (вогнетривкий матеріал із частинками меншими за 0,09 мм, тобто цементу) та дисперсійного середовища – речовини, що забезпечує хімічний зв'язок. У конкретному випадку гідратаційні в'яжучі представлені дисперсними системами: дисперсною фазою є високоглиноземистий або глиноземистий цемент, а дисперсійним середовищем

виступає вода.

Процес твердіння вогнетривких бетонів визначається такими основними механізмами:

1. Хімічною взаємодією вогнетривкої фази з дисперсійним середовищем, що забезпечує хімічне твердіння.

2. Перекристалізацією утворених хімічних сполук, яка зумовлює перекристалізаційне твердіння.

Зміна міцності вогнетривких бетонів залежно від температури має наступну динаміку:

1. При твердінні за низьких температур (близько 300°С) міцність матеріалу збільшується.

2. В температурному діапазоні від 300 до 1000°С, коли відбувається дегідратація в'яжучого, втрата хімічно зв'язаної води та руйнування полімерно-конденсаційної структури бетону, міцність значно знижується (так званий «провал міцності»).

3. По досягненні температури понад 1000°С спостерігається спікання матеріалу, що призводить до підвищення його міцності.

Основними мінералами високоглиноземистих цементів є сполуки: $CaO{\cdot}2Al_2O_3$ і $CaO{\cdot}Al_2O_3$. У технології футерування наливним методом використовується рідка суміш, яку заливають у простір між шаблоном і армуючим шаром. Основою для створення складів мас, застосовуваних у наливних футеровках, є дані про пластичні швидкотвердіючі суміші.

Технологічний процес футерування сталерозливних ковшів методом наливки (рис. 3.2) включає наступні етапи:

- Підготовка ковша та монтаж шаблонів
- Виготовлення наливної суміші
- Наливка футерування із застосуванням віброущільнення
- Витримка суміші протягом 60–70 хвилин для забезпечення твердіння
- Видалення шаблонів
- Зведення верхніх рядів футерування із використанням ковшових

виробів

- Сушіння готової футерівки.

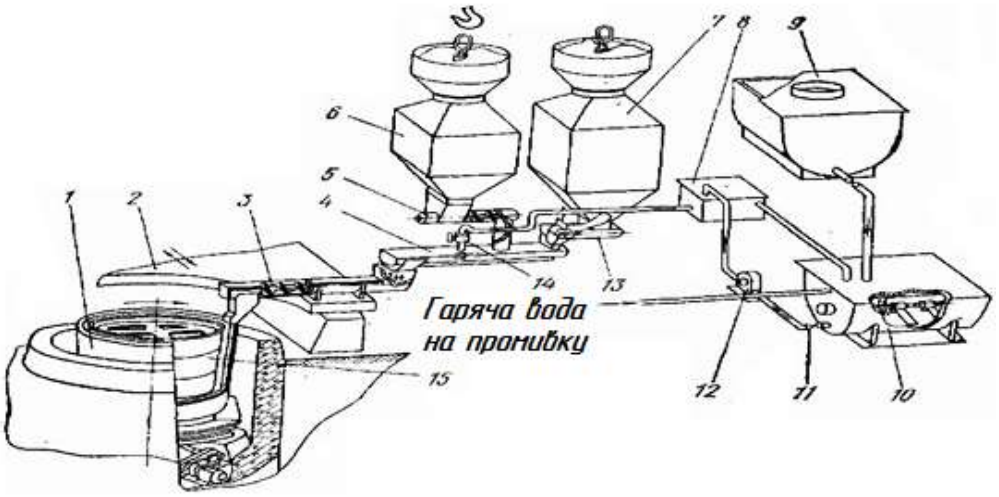
Згідно зі стандартом ASTM, класифікація бетонів проводиться на основі загального вмісту CaO у складі:

- ULC-бетони (ультранизькоцементні): < 1,0 % CaO

- LC-бетони (низькоцементні): 1,0–2,5 % CaO

- HC-бетони (звичайні): > 2,5 % CaO.

Низькоцементні та ультранизькоцементні бетони характеризуються тиксотропністю, щільною безпористою структурою, яка формується в процесі віброущільнення. Окрім цього, такі бетони відрізняються високими термомеханічними властивостями. На рисунку 3.3 наведено діаграму стану системи $MgO – Al_2O_3$.



1 – сталерозливний ківш; 2 – поворотна платформа; 3 – шнековий змішувач; 4 – шнековий транспортер; 5 – шнековий живильник; 6 – бункер шлаку; 7 – бункер глинозему; 8 – дозатор НЦЗП; 9 – бункер НЦЗБ; 10 - мішалка для НЦЗП; 11 – вентиль; 12 - насос для НЦЗП; 13 – стрічковий дозатор для НЦЗП; 14 – вентиль подачі НЦЗП; 15 - Шаблон.

Рисунок 3.2 – Схема установки для виготовлення монолітного футерування 250-т сталерозливних ковшів

У цій групі вогнетривів виділяють два типи: шпінельвмісні та шпінелеутворюючі бетони. Шпінельвмісні бетони виготовляються на основі

вже існуючої шпінелі, тоді як шпінелеутворюючі — на базі компонентів (Al_2O_3 і MgO), які формують шпінель безпосередньо під час експлуатації.

У системі присутня одна сполука — шпінель $MgAl_2O_4$ з температурою плавлення 2105 °С. Евтектика цієї шпінелі з оксидом магнію (із мольною часткою Al_2O_3 32,5%) плавиться за температури 1995 °С. У взаємодії з глиноземом шпінель утворює широкий спектр твердих розчинів, які мають евтектику з Al_2O3 при температурі 1920 °С (95,5% мольної частки Al_2O_3). Крім того, шпінель вступає в реакцію з оксидом магнію, формуючи також тверді розчини, максимальна мольна частка яких досягає 12%. Суміші магнезіальної шпінелі з периклазом або корундом застосовуються у виробництві шпінельних, шпінельнопериклазових і шпінельнокорундових вогнетривів із робочою температурою не нижче 1925 °С за умови відсутності домішок.

Шпінель синтезують із корунду та електроплавленого периклазу або технічного глинозему й спеченого периклазу, оскільки природної сировини, яка містить шпінель, у природі не існує.

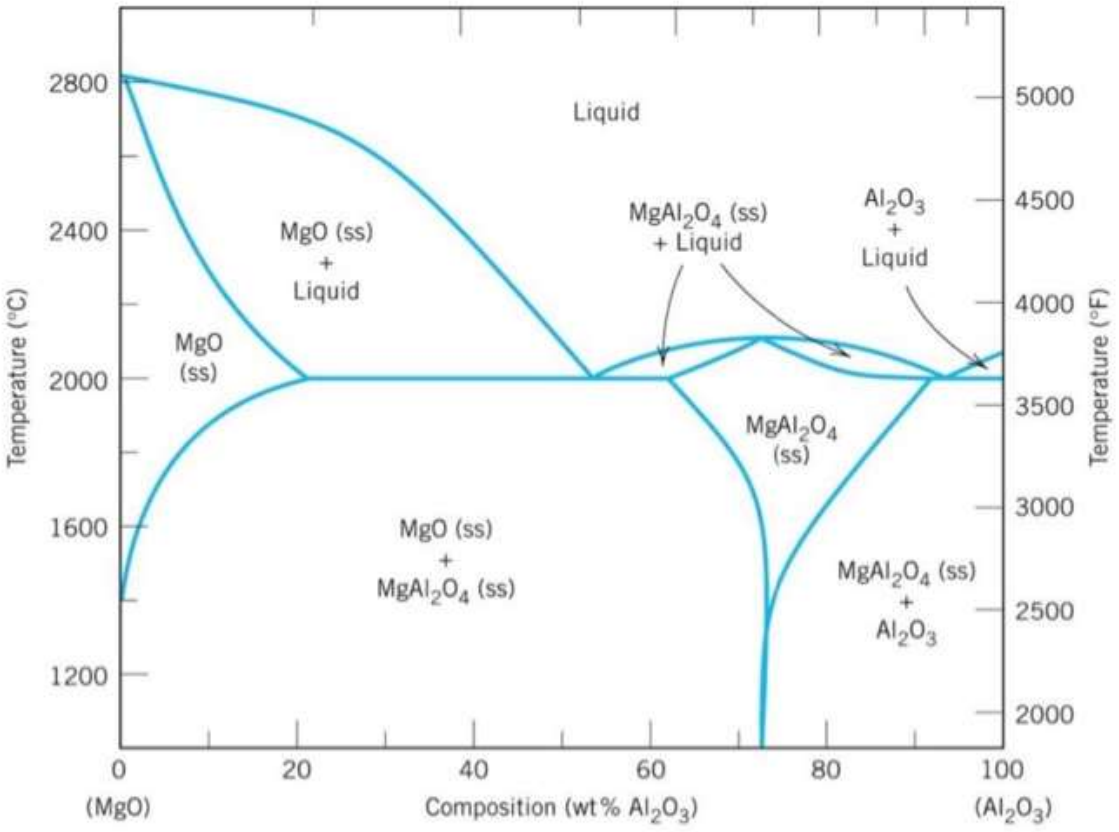


Рисунок 3.3 – Діаграма стану системи MgO – Al_2O_3

Синтез проводять методом твердофазного спікання або плавлення в електродугових печах. Під час спікання суміші корунду та периклазу обсяг отриманого матеріалу виявляється більшим за обсяг вихідної сировини. Це пов'язано з тим, що утворена шпінель має щільність нижчу за щільність корунду та периклазу. Таке розширення гальмує подальший процес спікання самої шпінелі, який має гетеродифузійний характер. Зважаючи на те, що коефіцієнт самодифузії магнію майже в десять разів перевищує алюміній, у процесі гетеродифузії виникає ефект Френкеля, що проявляється утворенням дифузійної пористості в зернах периклазу. При використанні порошків із дисперністю 1 мкм шпінель починає утворюватися за температури 900–1000 °С і завершує формування при 1300 °С.

Для грубодисперсних порошків синтез шпінелі відбувається при температурі 1500–1600 °С. У процесі утворення твердих розчинів і шпінелідів параметри ґрат практично не змінюються. Твердість шпінелі за шкалою Мооса становить 8–9 одиниць, а густина – 3,58 г/см³. Для створення шпінельвмісних або глиноземошпінельних бетонів використовуються плавлені чи спечені глиноземи як заповнювачі. Тонкодисперсні складники бетонів представлені шпінеллю, отриманою зі спеченого Al_2O_3, активним Al_2O_3 і високоглиноземистим цементом. У випадку шпінелеутворюючих або глиноземомагнезіальних бетонов замість готової шпінелі застосовують MgO.

Останнім часом глиноземомагнезіальні бетони широко використовуються як матеріали для футеровки, особливо для облицювання дна та стін сталерозливних ковшів у зоні шлаку. Ці бетони характеризуються стабільністю об'єму, високою корозійною стійкістю, опором проникненню шлаку і тріщиноутворенню. Водночас практика показала, що при тривалому використанні за високих температур футеровки з глиноземошпінельного бетону можуть руйнуватися через недостатню термостійкість і зносостійкість.

Найбільш поширеним матеріалом для футерування дна ковша є неформовані вогнетриви. Промислові випробування засвідчили, що у зоні удару струменя металу глиноземомагнезіальні композиції, які формуються у

процесі експлуатації футеровки, демонструють значно кращі характеристики порівняно з попередньо створеними шпінельними бетонами. Крім того, до складу сучасних бетонів часто додають тонкодисперсний SiO_2 (мікрокремнезем) та порошкоподібний MgO. Існує гіпотеза, що внесення магнієвого оксиду зменшує ризик розтріскування і лущення бетонів під час тривалої експлуатації, поліпшуючи тим самим стійкість футерування.

Вища шлакостійкість глиноземомагнезіальних бетонів може бути пов'язана зі збільшеним ущільненням при високих температурах під дією навантажень. Проведені дослідження підтверджують, що більша кількість та менші розміри зерен шпінелі, які утворюються безпосередньо у процесі нагрівання, мають значний вплив на поліпшення корозійної стійкості глиноземомагнезіальних бетонів порівняно з глиноземошпінельними.

В останні роки спостерігається тенденція переходу від глиноземошпінельних бетонів, які використовуються для стін сталерозливних ковшів, до глиноземомагнезіальних. Це зумовлено їхньою більшою стійкістю до ерозійного зношування, корозії та проникнення шлаку, а також їх нижчою собівартістю.

Незважаючи на високу експлуатаційну ефективність низькоцементних і ультранизкоцементних вогнетривких бетонів, їх приготування та процес футерування потребують дуже точного контролю над складом суміші, параметрами формування, сушіння та нагріву. Навіть мінімальні відхилення від технологічних вимог можуть суттєво погіршити їхні робочі властивості.

Технологія наливного футерування передбачає створення бетонної маси шляхом перемішування сухої суміші з водою. Отримана маса повинна бути однорідною за структурою та механічними властивостями в усьому обсязі наливки, щоб забезпечувати необхідні характеристики вогнетривкого бетону.

При розробці вогнетривких бетонів важливим є оптимальний підбір зернового складу суміші та регулювання її реологічних властивостей. Це дозволяє досягти стабільності структури завдяки високій концентрації твердої фази, забезпечуючи одночасно стійкість від розшаровування та добру

плинність системи.

Механічні властивості бетонної суміші формуються під час її змішування з водою через утворення коагуляційних структур. У початковий момент частинки тонкодисперсної складової (наприклад, реактивного глинозему) розділені тонкими прошарками води, через які діють ван-дер-ваальсові сили молекулярного тяжіння. Ці сили формують початкову міцність структури, значно нижчу за ту, яка досягається після завершення гідратації цементу та процесу спікання.

Недостатня кількість води для замішування й інтенсивний розвиток молекулярних сил зчеплення можуть створювати нерівномірний розподіл води і порушувати однорідність структурно-механічних властивостей у всьому обсязі системи.

Розвиток адсорбційних плівок і формування гідратних оболонок впливає на структуру бетонної маси, забезпечуючи їй виражені механічні й тиксотропні властивості концентрованої суспензії. Максимальна кількість контактів між частинками, на які діють ван-дер-ваальсові сили, покращує механічну стійкість бетону в процесах сушіння та термічної обробки.

Оптимальна вологість бетонної суміші є важливим показником не тільки для забезпечення максимальної коагуляційно-тиксотропної структури та збалансування міцнісних і формувальних властивостей, але й для досягнення найбільшої міцності після висихання і наступного нагрівання. У протилежному випадку змінюються властивості маси: послаблюються молекулярні сили взаємодії між частинками, маса поступово переходить до стану розведеної суспензії, втрачає зв’язність і припиняє формування. Як наслідок, збільшується пористість висушеного та обпаленого бетону, що знижує його шлакостійкість і стійкість до корозії.

Свіжоприготовлена наливна вогнетривка маса належить до в’язких систем, що висихають. У процесі твердіння та гідратації цементного зв’язування ця система послідовно проходить кілька структурних станів, кожен із яких характеризується певними значеннями та динамікою змін структурно-

механічних і термодинамічних параметрів. Зрештою, система набуває форми капілярно-пористого, пружно-крихкого тіла, в якому вода відіграє роль дисперсної фази, а тверда структура слугує дисперсійним середовищем.

Процес сушіння наливної футеровки формується під впливом низки чинників, які можна розділити на дві основні групи. Перша охоплює властивості самого матеріалу після висихання, зокрема його вологопровідність – здатність до інтенсивного переміщення вологи всередині. Чим вища вологопровідність матеріалу, тим рівномірніше розподіляється волога по товщині футеровки. Друга група чинників пов’язана із теплотехнічними та аеродинамічними умовами процесу сушіння. Сюди входять температура та вологовміст теплоносія, а також швидкість його руху. Ці параметри визначають місцеві інтенсивності випаровування та загальну швидкість сушіння.

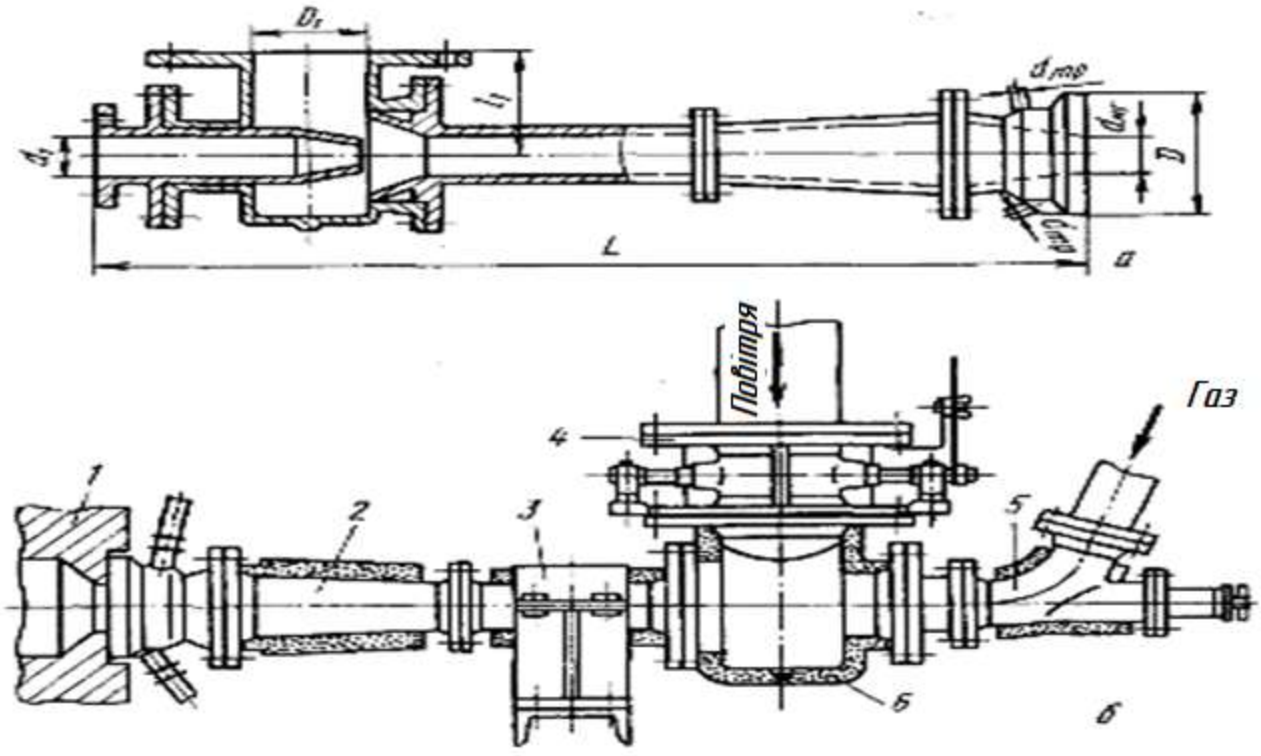
Також слід зауважити, що рівномірність випаровування залежить від характеру руху теплоносія. Чим більше турбуленцій, завихрень і нерівномірностей у потоці теплоносія, тим краще вирівнюється інтенсивність випаровування на поверхні футеровки. Відповідно, збільшення швидкості теплоносія та контрольовані зміни його аеродинамічних характеристик здатні значно підвищити ефективність і швидкість процесу сушіння.

Аналіз існуючих на різних підприємствах установок для сушіння сталерозливних ковшів свідчить, що найкращі результати досягаються при використанні сушильних установок двох типів. Вони забезпечують мінімальний час сушіння та високу якість висушених наливних футеровок.

Автоматизована сушильна установка зі швидкісним імпульсним пальником (див. рис. 3.4), яка працює при високих коефіцієнтах надлишку повітря (від 2 до 10). Подача повітря для горіння в такій установці здійснюється безупинно, тоді як газ подається періодичними імпульсами. Витрата газу, частота та тривалість імпульсів автоматично регулюються контролером за спеціальною програмою. Ця програма враховує температуру на робочій поверхні футерування дна ковша, яка вимірюється за допомогою

оптичного електронного пірометра. Повністю автоматизований процес виключає вплив людського чинника, що значно підвищує стабільність результатів сушіння.

Процес сушіння бетонного футерування у такій установці є подібним до методики сушіння вогнетривких виробів із ритмічною (дискретною) подачею теплоносія. У цьому способі матеріали періодично піддаються короткочасному впливу теплоносія, який подається з високою швидкістю і низькою відносною вологістю. Після активної фази процес переходить у більш тривалий пасивний період, протягом якого матеріал знаходиться у відносно спокійних умовах.



1 - тунель, 2 - пальник, 3 - опорна стійка, 4 - дросельний клапан,
5 - коліно, 6 - теплова ізоляція

Рисунок 3.4 – Встановлення імпульсного пальника, що працює на підігрітому повітрі та газу

У результаті чергування періодів обдування та «відпочинку» досягається зменшення градієнтів вологості та температури через товщину матеріалу, що сушиться. Це сприяє більш глибокому прогріву матеріалу, що, своєю чергою, покращує його вологопровідність і прискорює процес сушіння. Одночасно

відбувається зниження термодифузії вологи під впливом температурного градієнта всередині матеріалу (температура на поверхні вища, ніж у центральних шарах). Такий процес направляє вологу від поверхні всередину футерування разом із тепловим потоком, що ускладнює видалення вологи з матеріалу.

Установка для комбінованого сушіння передбачає застосування конвективного методу на першому етапі, коли видаляється адсорбційна та капілярна волога. Теплоносій температурою близько 200–250°С (зазвичай продукти згоряння природного газу зі спеціальної камери згоряння або плоскополум’яного пальника) направляється в стальківш. На фінальному етапі сушіння (усунення хімічно зв’язаної та кристалізаційної вологи) матеріал нагрівається через робочу поверхню футерування за допомогою факела газових пальників низького або середнього тиску.

На більшості металургійних заводів процес сушіння наливного футерування триває близько 70–80 годин. Водночас деякі виробники нетрадиційних цементозв’язуючих продуктів рекомендують скорочений графік до 24–30 годин. Таке суттєве зменшення строків сушіння досягається завдяки використанню спеціальних добавок, зокрема органічних волокон або металевого алюмінію. Останній взаємодіє з водою, формуючи дрібнопористу структуру, яка сприяє швидкому й рівномірному видаленню вологи. Однак ця технологія супроводжується ризиком вибухонебезпечного руйнування наливного футерування під час сушіння.

На рисунку 3.5 наведено графіки сушіння низькоцементних вогнетривких бетонів. Сушильні характеристики цих бетонів значною мірою залежать від їхнього мінерального та фракційного складу. Зокрема, підвищений вміст дрібної фракції у бетоні №3 обумовлює його схильність до утворення тріщин під час сушіння, що виключає можливість скорочення строків висушування до менше ніж 60 годин. Подовжений цикл сушіння бетону №2 (52 години) пов'язаний із високим вмістом цементної зв’язуючої речовини (CaO 1,5–1,8%).

Тривалість першої фази сушіння наливного футерування залежить від

так званої області сушіння — різниці між початковим і кінцевим рівнями вологовмісту. Чим менша область сушіння, тим коротший тривалість процес. На механізм сушіння також суттєво впливає тип зв’язку поглиненої рідини із сухою речовиною матеріалу.

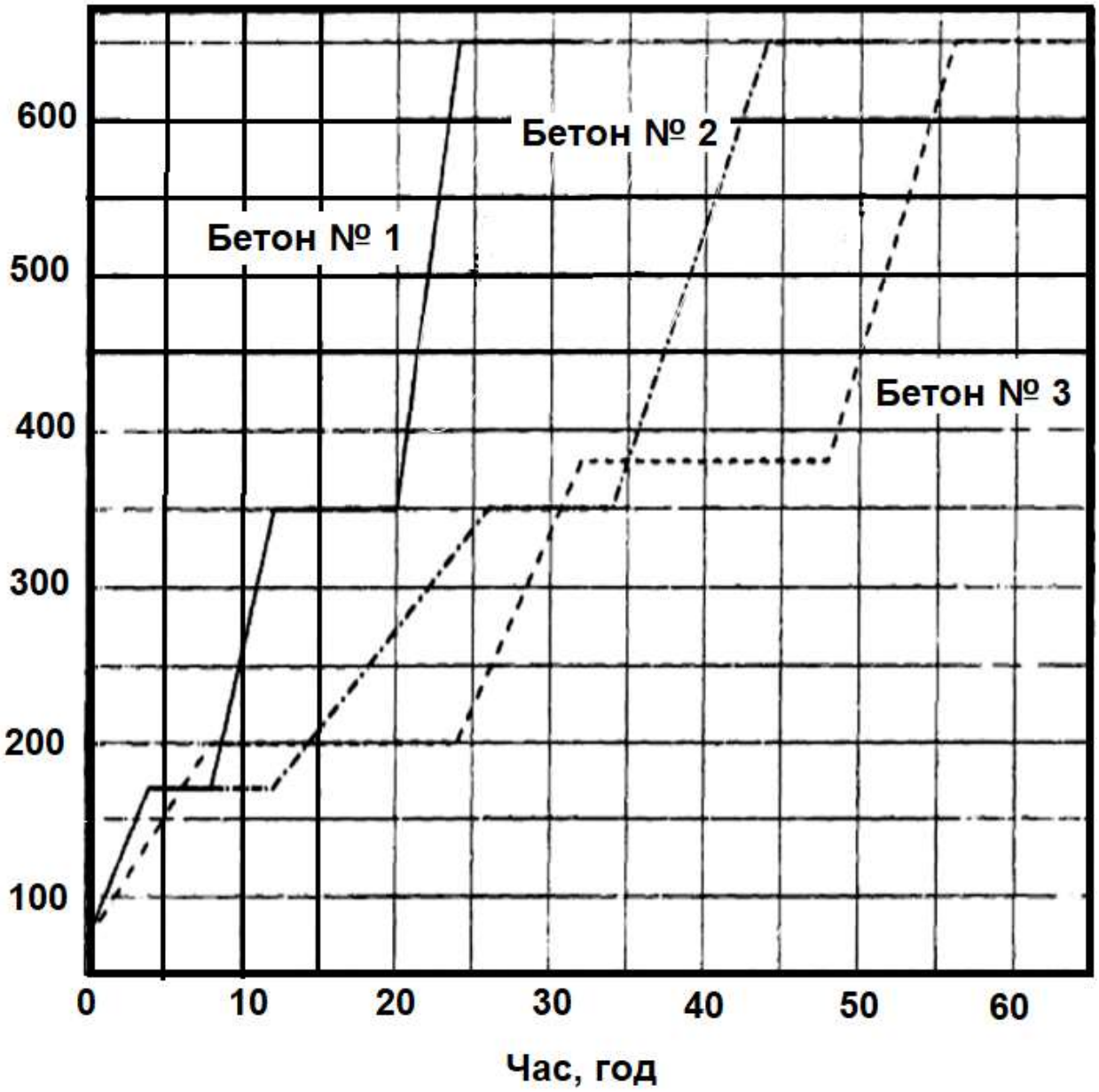


Рисунок 3.5 – Сушіння наливної футеровки сталерозливних ковшів

Оскільки видалення хімічно зв’язаної вологи, яка утворюється в процесі гідратації цементної зв’язки, потребує значних теплових витрат, що перевищують температурний діапазон видалення адсорбційної та капілярної вологи, зона першого етапу сушіння матеріалу зменшується на обсяг цієї

хімічно зв’язаної вологи. У цей період існує ймовірність виникнення усадкових тріщин, що особливо характерно для бетонів із надмірно тонкою структурою або при порушенні технології виготовлення бетонної суміші, наприклад через перевищення рекомендованого вмісту води замішування.

Додавання до складу бетону певної кількості гідравлічного в’яжучого, зокрема високоміцного глиноземистого цементу, призводить до збільшення тривалості другого етапу сушіння, який пов'язаний із видаленням кристалічної (хімічно зв’язаної) вологи. Цей процес проходить у температурному діапазоні від 300 до 600 °С. Контроль за сушінням у цей період має бути надзвичайно ретельним, адже дегідратація цементної зв’язки викликає помітне зміцнення структури бетону через підвищення капілярного тиску водяної пари. Різке збільшення цього тиску може спричинити утворення тріщин, відшарувань або навіть повне руйнування футеровки, особливо якщо перевищено кількість отриманого вогнетривкого бетону.

Ізотермічна витримка на кожному етапі сушіння необхідна для вирівнювання температурного поля поверхні футеровки та зниження температурного градієнта її товщини. Наприклад, різниця температур у товщині наливної футеровки днища сталевої ковші може сягати 400 °С. Це може бути наслідком неправильно організованого процесу тепло- і масообміну в ковші або передчасного переходу до наступного температурного етапу. У таких випадках на робочій поверхні футеровки завершується повне видалення вологи до температури початку дегідратації глиноземистого цементу, в той час як у глибинних шарах футеровки процес видалення фізичної вологи ще не завершився. Через це неможливо досягти температур, достатніх для видалення води з пор і капілярів відповідного розміру, які перебувають у межах від 110 до 130 °С.

Було запропоновано три типи низькоцементних вогнетривких бетонів (НЦВБ), які належать до двох класів: глиноземошпінельні (або шпінельвмісні) бетони №3 і №2, а також глиноземомагнезіальний (або шпінелеутворюючий) бетон №1. Бетони №3 і №2 відрізняються типом основного мінерального наповнювача: у бетоні №3 використовується табулярний глинозем, а в бетоні

№2 — плавлений корунд. Вони також мають відмінності у зерновій структурі.

У таблиці 3.1 наведено порівняльні характеристики низькоцементних вогнетривких бетонів (НЦВБ), які застосовуються для футеровки.

Таблиця 3.1 – Порівняльні показники НЦВБ, що застосовуються у футеровці

Найменування та властивості вогнетривкого бетону		Бетон №1	Бетон №2	Бетон №3
Хімічний склад:	Al_2O_3	90	93,1	90
	MgO	8	4,2	5
	CaO	1,0	≤ 2	1
	SiO_2	0,5	н.д.	2
	Fe_2O_3	н.д.	0,2	н.д.
Основні компоненти бетону:	Табулярний глинозем	++	+	++
	Плавлений корунд	-	++	-
	Періклаз	+	-	-
	Шпінель	-	+	+
	Реактивний глинозем	+	+	+
	Високоглиноземистий цемент	+	+	+
Межа міцності при стисканні, МПа	110°С × 24 год	≥ 50	140	35
	1000°С × 3 год	≥70	н. буд.	120
	1600°С × 3 год	≥100	170	250
Удавана щільність, г/см^3		3,04	3,1	2,95
Термін сушіння, год		32	52	64
Максимальна температура застосування		1850	1800	1750
Зерновий склад, мм		0 - 6	0 - 12	0 - 6

Наливне футерування сталерозливного ковша, яке застосовується замість кладки зі штучних вогнетривів, створює монолітну та безшовну робочу поверхню. Навіть якщо не враховувати вплив бетонного футерування на якість виробленої сталі, варто відзначити низку переваг цього методу. Зокрема, він забезпечує економне використання вогнетривких мас завдяки можливості багаторазового відновлення стінок і дна при збереженні незношеного робочого шару футерування.

Як видно з таблиці 3.1, бетони, які використовуються для стальківшів,

мають схожий хімічний склад і фізико-механічні характеристики. Проте бетон №3 вирізняється підвищеним вмістом SiO2 і найвищою міцністю після термообробки. У той же час максимальні показники міцності після сушіння демонструють бетони №2.

Технологічні показники бетонів демонструють значні відмінності. Наприклад, бетони №1 і №2 мають задовільні формувальні властивості, які включають плинність, рівномірність укладання та прийнятний час сушіння. Натомість при застосуванні бетону №3 виявлено певні труднощі: спливання дрібних фракцій у верхній частині наливки стальківша під час укладання та вібрації, підвищену вологість і надмірну тривалість роботи з віброшаблоном. Водночас бетон №1 демонструє найкоротший час сушіння, але обмежену плинність при наливанні футеровки стін ковша.

Експлуатаційні характеристики нормованих цементно-вогнетривких бетонів (НЦВБ), застосовуваних у процесі футерування, наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Експлуатаційні властивості НЦВБ для стальковша

Найменування та властивості вогнетривкого бетону		Бетон №1	Бетон №2	Бетон №3
Стійкість, плавок	Середня	66,1	58,5	72,7
	Максимальна	77	61	87
	Дно + стіни	2,13	2,8	1,96
		2,03	2,35	2,07

Як свідчать дані таблиці 3.2, за ступенем інтенсивності зносу футерування (у порядку зменшення швидкості зносу) бетони розташовані в такій послідовності: бетон №2, бетон №1, і бетон №3. Водночас їхній характер пошкоджень під час експлуатації є схожим: після проведення десятої плавки на «бійній» частині стін та днища з'являються тріщини. У процесі подальшої експлуатації тріщини поглиблюються, починають розмиватися, місцями виникає відшарування футерування, а також спостерігається ерозійне руйнування наливного шару. Поверхня бетону стає шорсткою із локальними

заглибленнями та налипанням шлаку. Найбільше знос відбувається в «бійній» частині стін і днища (за винятком бетону №1). У випадку бетону №3 додатково зафіксовано розмивання в зоні стику бетонного футерування стін і периклазовуглецевого футерування шлакового поясу.

Серед головних чинників руйнування бетону домінує утворення тріщин через термічне розширення та лущення поверхні, які виникають унаслідок проникнення металу та шлаку в ці тріщини. Для запобігання цим процесам структура матриці бетону була вдосконалена шляхом створення шпінелі, яка знижує проникність шлаку, а також додаванням мікрокремнезему, що оптимізує утворення шпінелі й зменшує термічну напругу (бетон №1).

Водночас більш інтенсивний знос бетону №1 у стінах ковша порівняно з днищем пояснюється підвищеною пористістю матеріалу. Це спричинено збільшенням води замішування в процесі підготовки бетону для забезпечення необхідної плинності при формуванні футерування стін. Таким чином, правильне регулювання реологічних властивостей бетону №1 дає змогу досягти рівномірної стійкості всіх зон футерування ковша, мінімізувавши питомі витрати вогнетривких матеріалів на одиницю готової продукції порівняно з іншими протестованими бетонами.

Загалом, завдяки використанню бетону №1 вдалося забезпечити стабільні показники довговічності футерування сталерозливних ковшів і зменшити витрати матеріалів на виробництво.

3.2 Розрахунок горіння природного газу в процесах сушіння ковшів

Сухий природний газ має склад, %

CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	N_2	Сума
94,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,2	3,3	100,0

Беремо вміст вологи в газі 1,0 %, коефіцієнт надлишку повітря α=1,2, температуру підігріву повітря ($t_в$) беремо 800 ^oC.

1. Рахуємо склад сухого газу на вологий робочий газ при вмісті H_2O=1,0%, здобудемо:

$$CH_{4вл} = CH_{4сух}\frac{100-H_2O}{100} = 94,0 \cdot 0,99 = 93,0\%.$$

Інші складові газу лишаються без змін при даній точності аналізу газу, що є один знак після коми, тому склад вологого робочого газу буде:

CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	N_2	H_2O	Сума
93,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,2	3,3	1,0	100,0

2. Теплотворність газу установлюємо за формулою:

$Q_н$=85,55CH_4+152,26C_2H_6+217,90C_3H_8+283,38C_4H_{10}+348,90C_5H_{12}=ккал/нм^3;

підставимо, тоді дістанемо:

$Q_н$ = 85,55·93,0 +152,26·1,2 +217,90·0,7 +283,38·0,4 +348,90·0,2 = 8475 ккал/нм^3.

3. Теоретично необхідну кількість сухого повітря установлюємо за такою формулою:

$$L_0=\frac{4,762}{100}(2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 8C_5H_{12})\ нм^3/нм^3.$$

підставляємо, тоді:

$$L_0=\frac{4,762}{100}(2 \cdot 93,0 + 3,5 \cdot 1,2 + 5 \cdot 0,7 + 6,5 \cdot 0,4 + 8 \cdot 0,2) = \frac{4,762}{100} \cdot 197,9 = 9,42\ нм^3/нм^3.$$

Беремо вміст вологи атмосферного повітря і добуваємо за формулою:

$$L_0 = (1 + 0,0016d)L нм^3 кг, або\ (нм^3/нм^3)$$

Теоретично необхідна кількість повітря з урахуванням його вологості:

$$L_0 = 1,016 \cdot 9,42 = 9,57 нм^3/нм^3.$$

4.Дійсна кількість повітря при коефіцієнті надлишку повітря α=1,2

добуваємо за формулою:

$$L_0 = \alpha L_0 \text{нм}^3/\text{кг або } (\text{нм}^3/\text{нм}^3) \text{ палива;}$$

для сухого повітря:

$$L\alpha = 1{,}2 \cdot 9{,}42 = 11{,}30 \text{ нм}^3/\text{нм}^3;$$

для атмосферного повітря:

$$L\alpha = 1{,}2 \cdot 9{,}57 = 11{,}48 \text{ нм}^3/\text{нм}^3;$$

5.Кількості та склад продуктів горіння при α=1,2. Добуваємо обсяг окремих складових за формулами:

$$V_{CO2} = 0{,}01(CO_2+CH_4+2C_2H_6+3C_3H_8+4C_4H_{10}+5C_5H_{12}) \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$
$$V_{H2O} = 0{,}01(2CH_4+3C_2H_6+4C_3H_8+5C_4H_{10}+6C_5H_{12}+H_2O+0{,}16dl\alpha) \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$
$$V_{N2}=0{,}01\ N_2+0{,}79l \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$
$$V_{O2} = 0{,}21(\alpha-1)L_0 \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$

Підставляємо, тоді добудемо кількісний склад продуктів горіння:

$$V_{CO2} = 0{,}01\ (0{,}02 +93{,}0 +2 \cdot 1{,}2 +3 \cdot 0{,}7 +4 \cdot 0{,}4 +5 \cdot 0{,}2) = 1{,}003 \text{ нм}^3/\text{нм}^3;$$
$$V_{H2O} = 0{,}01\ (2 \cdot 93{,}0 +3 \cdot 1{,}2 +4 \cdot 0{,}7 +5 \cdot 0{,}4 +6 \cdot 0{,}2 +1{,}0 +0{,}16 \cdot 10 \cdot 11{,}3) = 2{,}146 \text{ нм}^3/\text{нм}^3;$$
$$V_{N2} = 0{,}01 \cdot 3{,}3 +0{,}79 \cdot 11{,}3 = 8{,}953 \text{ нм}^3/\text{нм}^3;$$
$$V_{O2} = 0{,}21\ (1{,}2\text{-}1) \cdot 9{,}42 = 0{,}396 \text{ нм}_3/\text{нм}_3.$$

Загальна кількість продуктів горіння:

$$V\alpha = 1{,}003 +2{,}146 +8{,}953 +0{,}396 = 12{,}498 = 12{,}5 \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$

Відсотковий склад продуктів горіння дорівнюватиме:

$$CO_2 = \frac{1{,}003 \cdot 100}{12{,}5} = 8{,}0\%;$$

$$H_2O = \frac{2{,}146 \cdot 100}{12{,}5} = 17{,}2\%;$$

$$O_2 = \frac{0{,}396 \cdot 100}{12{,}5} = 3{,}2\%.$$

Усього: 100,0%.

6. Матеріальний баланс процесу горіння складається для 100 нм³ газу при α = 1,2. Розрахунок здійснюється виключно у вагових одиницях. Для виконання розрахунків матеріального балансу використовуємо табличну форму. Перетворення 100 нм³ кожного газу у кілограми відбувається шляхом множення об'єму на його питому вагу (γ_0 кг/нм³).

Таблиця 3.3 – Матеріальний баланс процесу горіння

Надходження	кг	%	Витрата	кг	%
Природний газ:			Продукти горіння:		
CH_4 = 93,0 · 0,717	66,58	4,31	CO_2 = 1,003 · 100 · 1,977	198,50	12,83
C_2H_6 = 1,2 · 1,356	1,63	0,10	H_2O = 2,146 · 100 · 0,804	172,50	11,15
C_3H_8 = 7 · 2,020	1,41	0,09	N_2 = 8,953 · 100 · 1,251	1120,63	72,42
C_4H_{10} = 0,4 · 2,840	1,13	0,07	O_2 = 56,50 · 100 · 1,429	56,50	3,64
$C5H_{12}$ = 0,2 · 3,218	0,64	0,04	Нев'язка:	-0,59	-0,04
CO_2 = 0,2 · 1,977	0,39	0,03			
N_2 = 3,3 · 1,251	4,13	0,27			
H_2O = 1,0 · 0,804	0,80	0,05			
Повітря:					
O_2 = 197,9 · 1,2 · 1,429	339,80	21,95			
N_2=197,9·1,2·3,762·1,251H_2O=0,1	116,50	72,15			
6·10·11,3·0,804	14,53	0,94			
РАЗОМ	1547,54	100,00	РАЗОМ	1547,54	100,00

7. Теоретична температура горіння. Установлюємо загальне теплоутримання продуктів горіння за формулою:

$$I_{\text{общ}} = \frac{Q^{\text{рн}}}{V_\alpha} + \frac{i}{V_\alpha} \frac{t}{i_{\text{в}}} \text{ккал/нм}^3.$$

При підігріві повітря до 800 ^{0}C і =1,2. За довідковими даними знаходимо

при $t_в = 800^0$C теплоутримання $i_в = 265$ ккал / нм^3, тоді добудемо:

$$I_{общ} = \frac{8475}{12,5} + \frac{11.48 \cdot 256}{12,5} = 678 + 244 = 922 \text{ккал/нм}^3.$$

По i-t діаграмі добуваємо теоретичну температуру горіння при α=1,2 дорівнюватиме:

$t_{теор} = 2190^0$C.

Калориметрична температура по i-t діаграмі при α=1,2 дорівнюватиме:

$t_k = 2313^0$C.

Для формулювання калориметричної температури горіння палива аналітичним способом задається температурами $t_1=2300^0$C і $t_2=2400^0$C, і за довідковими даними визначаємо тепломісткість продуктів горіння:

$t_1=2300^0$C $t_2=2400^0$C

$CO_2 = 0,080 \cdot 1351,5 = 108,00,080 \cdot 1416,5 = 113,0$

$H_2O = 0,172 \cdot 1109,1 = 190,50,172 \cdot 1167,4 = 200,5$

$N_2 = 0,716 \cdot 824,6 = 590,00,716 \cdot 863,5 = 618,0$

$O_2 = 0,032 \cdot 837,3 = 27,90,032 \cdot 915,1 = 29,2$

1,000 нм^3 $i_1=916,4$ ккал/нм^3 $i_2=960,7$ ккал/нм^3

Отже, $960,7 > i_{заг} > 916,4$

$960,7 - 916,4 = 44,3^0$C

$922,0 - 916,4 = 5,6^0$C,

складемо пропорцію, і отримаємо:

$44,3 \rightarrow 100^0$C

$5,60$C$\rightarrow$x

$$X=\frac{5,6\cdot 100}{44,3}=12,7\approx 13^0C;$$

Звідси $t_к$= 2300 +13=2313^{0}C.

8. Обрахуємо дійсну середню температуру пічних газів при коефіцієнті К = 0,8.

Добуваємо тепловміст

$$i_{заг} = i_{заг} \cdot \eta_к = 922 \cdot 0,8 = 737 \text{ ккал / нм}^3.$$

По i-t діаграмі добуваємо дійсну температуру горіння при α=1,2 з урахуванням дисоціації: $t_г$ = 1870^{0}C.

При розрахунку горіння палива одержимо:

$Q_{рн}$ = 8475 ккал/нм^3 (ккал/кг) $G_м$= 5 т/год

L_0 = 9, 42 нм^3/ кг $W_н$= 35%

$L_{/0}$=9, 57 нм^3/нм^3 (Нм^3/кг) $W_к$= 8%

$L_{/\alpha}$ = 11,48 нм^3/ кг m_0=60 кг/м^3 год

V_α= 12,5 нм^3/кг α= 1,2

9. Кількість вологи:

$$N = G_м\frac{W_н - W_к}{100 - W_н} = 5000 \cdot \frac{35-8}{100-35} = 2077 \text{кг/год}$$

10 Розрахунок горіння палива:

$$V_0 = L_{/0} + \Delta V = 9,57 + 1,02 = 10,59 \text{ нм}^3/\text{кг},$$

$$\Delta V = V_\alpha - L_{/\alpha} = 12,5 - 11,48 = 1,02 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

11. Розрахунок початкових параметрів сушильного агента при

$t_{нач}$ = 800^{0}C і $i_{заг}$ = 737 ккал / нм^3:

$$i_{заг} \cdot 0,9 + \frac{L_\alpha + X}{V_\varepsilon} I^{воз_{20}} = I^{дым_{800}} + \frac{X}{V_\alpha} I_{800^{воз}},$$

$$i_{воз20} = ct = 0,31 \cdot 20 = 6,2 \text{ ккал / нм}^3$$

$$i_{воз800} = 265,1 \text{ ккал / нм}^3$$

$$i_{дим800} = 283,1 \text{ ккал / нм}^3$$

Тоді

$$737 \cdot 0,9 + (11,48 + x) \cdot 6,2/12,5 = 283,1 + x \cdot 265,1/12,5$$

$$663,3 + 5,694 + 0,496\ x = 283,1 + 21,208\ x$$

$$-20,712\ x = -\ 385,894$$

Звідси розшукаємо значення:

$$x = 385,394/20,712 = 18,63 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Загальна кількість повітря, що йде для горіння та розведення димових газів:

$$L_{//\alpha} = 11,48 + 18,63 = 30,11 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Загальний коефіцієнт надлишку повітря:

$$\alpha_{об} = \frac{L_{\alpha}^{//}}{L_0} = \frac{30,11}{9,42} = 3,20.$$

Значення загального коефіцієнта надлишку повітря можна віднайти за формулою:

$$i_{дим} = \frac{Q^{р_н} \cdot \eta_T + \frac{I_в}{V}\alpha_{общ} L^{\ 0}}{V_0 + (\alpha_{общ} - 1) \cdot L^{\ 0}},$$

α=3, для $t_{поч} = 800^0$C, $i_{дим} = 275$ ккал/нм^3;

$t=17^0$C, $\varphi = 70\%$, $İ_в = 9,0$ ккал/кг, V= 0,85 м^3/кг сухого повітря;

Тоді

$$275 = \frac{8475 \cdot 0,9 + \frac{9,0}{0,85} \cdot \alpha_{общ} \cdot 9,57}{10,59 + (\alpha_{общ} - 1) \cdot 9,57}, \text{ одержимо}$$

$$275 = \frac{7627,5 + 101,33 \cdot \alpha_{общ}}{10,59 + 9,57 \cdot \alpha_{общ} - 9,57},$$

$$275\ (10{,}59 + 9{,}57\alpha_{заг} - 9{,}57) = 7627{,}5 + 101{,}33\alpha_{заг}$$

$$2912{,}25 + 2631{,}75\ \alpha_{заг} - 2631{,}75 = 7627{,}5 + 101{,}33\ \alpha_{заг}$$

$$2530{,}42\ \alpha_{заг} = 7347$$

Звідси

$$\alpha_{заг} = 7347/2530{,}42 = 3{,}0 \text{ приймаємо } \alpha = 3{,}0.$$

Вологовміст димових газів:

$$\text{dнач} = \frac{804V_{H_2O}}{1{,}977V_{CO_2} + 1{,}251V_{N_2} + 1{,}429V_{O_2}},$$

$$V_{н2о} = 0{,}01(2CH_4 + 3C_2H_6 + 4\ C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12} + H_2O + 0{,}16 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 9{,}42) =$$

$$= 0{,}01\ (2 \cdot 93 + 3 \cdot 1{,}2 + 4 \cdot 0{,}7 + 5 \cdot 0{,}4 + 6 \cdot 0{,}2 + 1 + 0{,}16 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 9{,}42) = 2{,}42$$

$$V_{N2} = 0{,}01 \cdot N_2 + 0{,}79 \cdot \alpha \cdot L_0 = 0{,}01 \cdot 3{,}3 + 0{,}79 \cdot 3 \cdot 9{,}42 = 22{,}36$$

$$V_{O2} = 0{,}21\ (3{,}0\text{-}1) \cdot L_0 = 0{,}21\ (3{,}0\text{-}1) \cdot 9{,}42 = 3{,}96$$

Тоді дістанемо:

$$d_{нач} = \frac{804 \cdot 2{,}42}{1{,}977 \cdot 1{,}003 + 1{,}251 \cdot 22{,}36 + 1{,}429 \cdot 3{,}96} = 54{,}63 \text{г/кг сухого повітря.}$$

12. Побудова теоретичного процесу сушіння:

При $t_{поч} = 800^0$C і $d_{поч} = 54{,}63$г/кг.

$$\text{Інач} = \frac{Q^{рн} \cdot \eta_T + \frac{I_в}{V}\alpha \cdot L\ \ ^0}{1{,}977V_{CO_2} + 1{,}251V_{N_2} + 1{,}429V_{O_2}},$$

$$I_{нач} = \frac{8475 \cdot 0{,}9 + \frac{9{,}0}{0{,}85} \cdot 3{,}0 \cdot 9{,}57}{1{,}977 \cdot 1{,}003 + 1{,}251 \cdot 22{,}36 + 1{,}429 \cdot 3{,}96} = \frac{7627{,}5 + 303{,}99}{35{,}61} = 223 \text{ кал/кг.}$$

$$t_k = 110^0\text{C},$$

$$d_2 = 305 \text{ г/кг сухого газу.}$$

Витрата сухих газів для процесу сушіння:

$$G^{теорс.г.} = \frac{1000n}{d_2 - d_{НАЧ}} = \frac{1000 \cdot 2077}{305 - 54{,}63} = 8296 \text{кг сухого газу/година.}$$

13.Втрати теплоутримання газів у процесі сушіння.

Загальні теплові втрати:

$$q_{пот} = q_{мат} + q_{окр},$$

Витрата тепла на нагрівання матеріалу:

$$q_{мат} = G_{сух} \cdot C_м\ (t_k - t_н) + W\ (t_k - t_н),$$

$$Gc_{ух} = \frac{100 - W_к}{100} = 5000 \cdot \frac{100 - 8}{100} = 4600 \text{ кг/год}.$$

$$W = 5000\text{-}4600 = 400\text{кг/год}$$

$$t_к = 80^0\text{C (схоплюємо)},$$

$$t_н = 5\ ^0\text{C (схоплюємо)},$$

$$C_м = 0{,}21\ \text{ккал/год.}$$

$$q_{мат} = 4600 \cdot 0{,}21\ (80\text{-}5) + 400\ (80\text{-}5) = 102450\ \text{ккал/год.}$$

14.Втрати тепла через стінку в довкілля:

$$q_{окр} = \frac{1}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + 0{,}06}\,(t_{ст1} - t_в)F,$$

$$S_1 = 0{,}012\text{м}$$

$$\Lambda_1 = 50\ \text{ккал/м·год·град}$$

$$S_2 = 0{,}03\text{м}$$

$$\Lambda_2 = 0{,}12\ \text{ккал/м·год·град}$$

$$t_в = 15^0\text{C}.$$

$$t_{cm1} = \frac{t_{срМ} + t_{срГ}}{2},$$

$$t_{срм} = t_{нм} + 2/3(t_{к.м.} - t_{н.м.}) = 5 + 2/3\ (70\text{-}5) = 55^0\text{C}.$$

Середню температуру газів добуваємо за формулою:

$$t_{срг} = \frac{(t_{нг} - t_{нм}) - (t_{кг} - t_{км})}{2{,}3\text{Lg}\frac{t_{нг} - t_{нм}}{t_{кг} - t_{нм}}} + t_{ср.м}, \text{ підставимо}$$

$$t_{ср.г} = \frac{(800-5)-(110-80)}{2{,}3\text{Lg}\frac{795}{30}} + 55 = 288^0\text{C},$$

Тоді

$$t_{ст.1} = \frac{55 + 288}{2} = 172^0\text{C},$$

Поверхня ковша становить при L = 6м, і $D_{ср}$ = 1486м є:

$$F = \pi DL = 3{,}14 \cdot 1{,}486 \cdot 6 = 56{,}0\ \text{м}^2,$$

Отже, що

$$q_{окр} = \frac{1}{\frac{0{,}012}{50} + \frac{0{,}03}{0{,}12} + 0{,}06}\,(172 - 15) \cdot 56{,}0 = 28361\ \text{ккал/час}.$$

$$q_{окр} = 102450 + 28361 = 130811\ \text{ккал / год.}$$

Втрати тепловмісту:

$$I_{пот} = \frac{q_{пот}}{Gc.г.^{теор}} = \frac{130811}{8296} = 1577 ккал/кг сухого газу.$$

15. Побудова на i-d діаграмі дійсного процесу сушіння:

$I_{пот}$ =15,77 ккал/кг сухого газу;

$t_{кон}$ = 1100С;

$d_{кон}$ = 258 г/кг сухого газу.

Дійсна витрата газів на сушіння

$$G_{с. р.} = \frac{1000n}{d_{кон} - d_{нач}} = \frac{1000 \cdot 2077}{258 - 54,63} = 10213 кг сухого газу/год.$$

Витрата тепла на сушіння:

$Q = G_{с. р.} (I_{/поч} - I_в) - n \cdot t_{н.м.}$ отримаємо при $I_{/поч}$ = 206 ккал/кг і t = 800^0С

отримаємо:

$$Q = 10213 \cdot (206-9) - 2077 \cdot 5 = 2001576 ккал/год.$$

16. Витрата тепла в ковші:

$$Q_{ковша} = \frac{2001576}{0,9} = 2223973 ккал/год.$$

17. Витрата природного газу:

$$B = \frac{2223973}{8475} = 262 кг/год.$$

Таблиця 3.4 – Тепловий баланс сушіння ковша

Надходження тепла		
Найменування	Ккал/год	%
1.Тепло, що вноситься газом: $q_т = B \cdot Q_{рн} = 262 \cdot 8475 = 2223973$	2223973	97,95
2. Тепло, що вноситься атмосферним повітрям: $q_в = \alpha \cdot L_0 I_{в20} \cdot B = 3,0 \cdot 9,57\ 0,31 \cdot 20 \cdot 262 = 46637$	46637	2,05
Всього:	2270610	100
Витрата тепла		
Нагрів матеріалу $q_{мат}$	102450	4,51
Втрати у довкілля $q_{окр}$	28361	1,25
Випаровування та нагрівання вологи матеріалу: $q_{випр} = (600 + 0,47\ 110-5)\ 2077$	1343196	59,16
Тепло відходять гаів за вирахуванням тепла, що виноситься вологою, що випаровується: $q_{відх} = (3,0 \cdot 9,57 + 1,02)\ 262\ 34,8$	271066	11,94
Втрати тепла у ковші $q_{ков} = B\ Q_{нр} (1-\eta_к) = 262\ 8475\ (1-0,9)$	222045	9,78
Нев'язка балансу:	+ 303492	+ 13,36
Всього:	2270610	100

Нев'язка складає: 15%, що допустимо.

3.3 Технологія та устаткування високотемпературної експлуатації футерування сталерозливальних ковшів

Для забезпечення високої стійкості основних і високоглиноземистих вогнетривких матеріалів важливо підтримувати температуру футерування сталерозливного ковша на рівні не менше ніж 800 °С протягом усього циклу його експлуатації. Це сприяє мінімізації або навіть повному усуненню проміжних ремонтів найбільш схильних до зносу частин, таких як футерування днища та шлакового пояса. З огляду на ці вимоги, футерування днища та шлакового пояса варто виконувати із застосуванням вогнетривких матеріалів, які мають аналогічну стійкість до тих, що використовуються для робочого шару стін ковша.

Експлуатація футеровки ковшів при високих температурах із використанням усіх типів вогнетривких матеріалів забезпечує ряд переваг, зокрема зменшення перегріву та втрат металу у сталеплавильних агрегатах. Це веде до стабілізації температури сталі на етапі її випуску, скорочення теплових втрат під час розливу, підвищення виходу придатних заготовок, а також до покращення якості прокату. Варто зазначити, що енерговитрати на підвищення температури футерування ковша від 1100 до 1200 °С є в 20 разів нижчими, ніж необхідно для еквівалентного підвищення температури сталі від 1500 до 1520 °С.

Ефективне збереження тепла, акумульованого футеровкою ковша під час його нагріву на стенді і перебування сталі всередині ковша, досягається через застосування знімної футерованої кришки та оптимізацію оборотності ковша. Така кришка повинна залишатися на ковші не тільки під час його нагрівання, але й у період очікування плавки з агрегату, при розливанні металу, встановленні сталерозливної склянки чи заміні шиберних затворів.

Для забезпечення швидкої оборотності ковшів усі роботи зі заміни сталерозливної склянки та подачі засипки в її канал рекомендується проводити зовні ковша. Це можливо через використання високостійких гніздових виробів у розливному вузлі та спеціального обладнання, яке дозволяє подавати засипки зовнішнім чином.

Щоб уникнути перегріву металевого кожуха ковша понад 270 °С у процесі його експлуатації при високих температурах, між арматурним шаром та корпусом необхідно забезпечити наявність ефективного теплоізоляційного матеріалу.

Використання футерованих кришок у процесі експлуатації ковшів при високих температурах дозволяє знизити температуру сталі на випуску на 10-30 °С, скоротити тривалість плавки, зменшити знос пічних вогнетривких матеріалів на 15%, продовжити термін служби футеровки ковша, а також підвищити вихід придатних заготовок на 0,3-0,6%.

Сучасне обладнання, призначене для термообробки футерування сталерозливних ковшів різної ємності, повинно забезпечувати ефективне сушіння футерування за температури до 600–700 °С, а також його нагрівання до рівня 1200 °С. Тепературне значення нагрівання є умовним параметром, який може визначатися, наприклад, на основі температури робочої поверхні футерування в певному місці днища або стінок ковша, коли досягається рівномірний прогрів робочого шару футерування по всій його товщині.

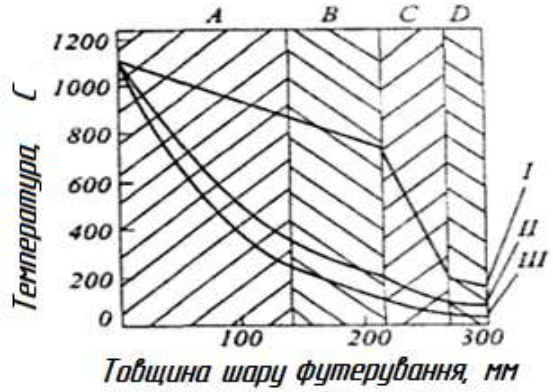
Для здійснення нагріву футерування ковшів зазвичай використовують газоподібне паливо. Під час цієї процедури ковш може займати різну позицію: вертикальну (днищем вниз або вгору) чи горизонтальну. Найбільш поширеним є використання вертикальних нагрівачів зі становищем ковша днищем вниз. Для підйому і переміщення робочої кришки застосовують кілька методів: похилий, вертикальний або комбінований, який передбачає одночасний підйом і поворот.

Досягнення необхідної високої температури футерування під час підігріву потребує забезпечення належної герметизації робочого простору ковша, де здійснюється теплообмін. Для цього ківш має бути закритий не лише кришкою, але й надійно ущільнений. Сучасні технології нагрівального обладнання приділяють цьому аспекту особливу увагу.

Футерування знімної кришки ковша може бути монолітним, виконаним із жаростійких матеріалів, залежно від експлуатаційних температур. Для цього використовують жаростійкий бетон, піношамот, набивні маси або спеціальні блоки. Особливо ефективними є волокнисті матеріали у формі матів, модулів

або блоків, що укладаються поздовжньо або поперечно. Вони мають низку переваг, таких як низька теплопровідність, висока стійкість до раптових коливань температур і спрощені процедури ремонту.

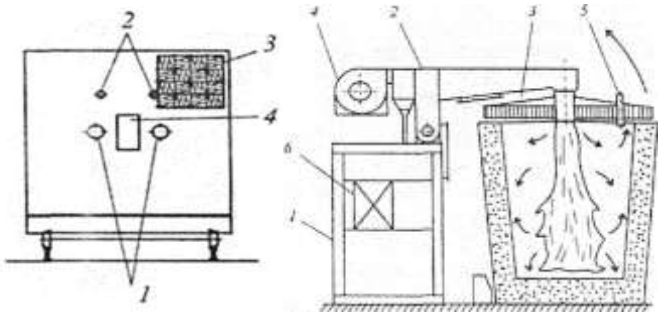
На рисунку 3.6 наведено графік залежності розподілу температури у футеруванні ковша залежно від тривалості процесу нагріву. Рисунок 3.7 демонструє схему обладнання компанії "Кейдр Термікон" (США), яке призначене для нагріву футерування ковша в горизонтальному положенні із рекуперацією димових газів.



A – робочий шар; B – основний шар; C – ізоляція; D – кожух;

I – стан рівноваги; II і III - нагрівання на протязі 4 і 3 год відповідно

Рисунок 3.6 – Розподіл температури по товщині футерування ковша ємністю 100 т від тривалості нагрівання



1 - пальник; 2 – термопари; 3 – модулі волокнистої ізоляції; 4 - канал для відведення димових газів рекуператор; 5 - візок; 6 – рама. 7 – рекуператор; 8 - відведення газів з рекуператора; 9 - вентилятор та фільтр; 10 – панель для управління.

Рисунок 3.7 – Схема обладнання фірми "Кейдр Термікон" (США) для нагріву футерування ковша в горизонтальному положенні з рекуперацією димових газів

Фірма "Мапеко" з Німеччини спеціалізується на виробництві обладнання для вертикального та горизонтального нагрівання футерування сталерозливних ковшів, що мають ємність до 200 тонн, з максимальною температурою до 1200 °С. Один із прикладів такого обладнання – стенд високотемпературного нагрівання ковшів об'ємом до 250 тонн. Система стенду включає металеві конструкції, стаціонарну футеровану парасольку з вбудованим трубчастим рекуператором і центрально розташованим двоканальним газовим пальником підвищеної теплової потужності, високотискний вентилятор, а також футеровані димові канали для відведення вихлопних газів. Ківш встановлюється у вертикальному положенні і переміщується на викотному візку під парасольку для нагрівання.

Під час роботи стенду для нагрівання футерування ковша споживається природний газ у кількості 200–250 нм³/год. При цьому температура повітря, яке подається до пальника, досягає близько 200 °С, а температура димових газів на виході становить близько 300 °С. Експлуатаційна практика демонструє високу довговічність пальників і рекуператорів – більше одного року безперебійної роботи. Для ізоляції ковшів із нагрітою футерівкою використовуються зварені металеві кришки, покриті вогнетривкою масою.

У процесі розробки оптимальних теплових режимів для експлуатації ковшів з основними (пекоперіклазовими) та шамотними футеровками було проведено дослідження температурних змін нової кладки під час сушіння та нагрівання на стенді. Дослідження охоплювало процеси очікування випуску плавки з агрегату, сам випуск, обробку сталі поза піччю, її розлив у виливниці, а також очищення ковша. Замір температур здійснювався термопарами типу ХА, які встановлювалися у кількох точках: біля поверхні футерівки (точка а); на глибині 40 мм від поверхні футерівки (точка б); на межі між робочим шаром та арматурним шаром (точка в); а також між теплоізоляційним шаром і металевою бронею (точка г). Вимірювання проводилися на трьох висотних рівнях: 3300 мм, 1800 мм та 300 мм від днища.

Особливістю замірів у точці а було те, що її температура визначалася

лише під час першого нагрівання нової футеровки. Надалі термопари в цій зоні виходили з ладу через контакт із розплавленим металом. На графіку (рис. 3.8) показано зміни температур у точках а, б і г для горизонту II пекоперіклазової та шамотної футеровок під час високотемпературного нагрівання після завершення процесу сушіння.

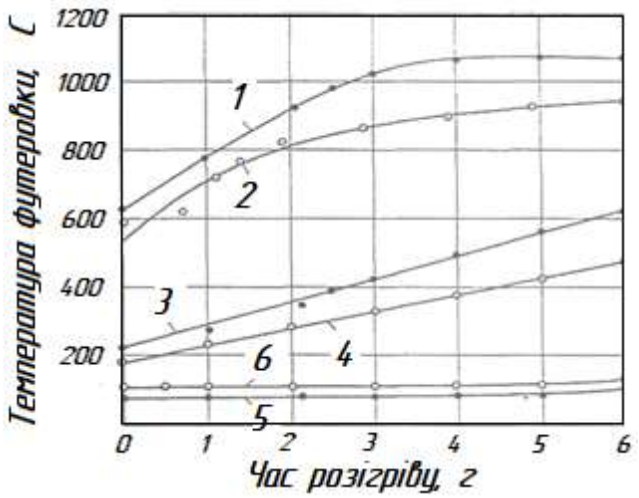


Рисунок 3.8 – Зміна температури основної (чорні кружки) і шамотної (світлі кружки) футерування сталерозливних ковшів на горизонті II ковша при розігріві на високотемпературному стенді 1,2 - точка а, 3,4 - точка b; 5, 6 – точка с

Під час нагрівання протягом шести годин температура на межі теплоізоляційного шару та броні залишалася майже стабільною (у межах 100-120°С), тоді як на поверхні футерування досягала 820-1070°С і стабілізувалася через 2-3 години після початку процесу. Водночас температура на межі арматурного та робочого шарів поступово зростала впродовж усього періоду нагрівання. За результатами досліджень встановлено, що протягом двох годин нагрівання на стенді можна забезпечити температуру внутрішньої поверхні футерування понад 600°С, що відповідає необхідним умовам для використання пекоперіклазових вогнетривких матеріалів.

Для визначення оптимальної тривалості охолодження футерування, яка дозволяє утримувати температуру внутрішньої поверхні вище 800°С, було проведено аналіз динаміки охолодження ковша після розливу металу, коли

ківш знаходився на позиції очікування. Виявлено, що на ківшах без теплоізоляційних кришок температура внутрішньої поверхні футерування з пекоперіклазу знижувалася до значень нижче 800°С за 20 хвилин, а з шамоту — за 10 хвилин. За початкової температури 930-950°С встановлено, що застосування теплоізоляційних кришок дозволяє зберігати потрібний рівень температури (800°С і вище) для пекоперіклазового футерування протягом однієї години, а для шамотного — протягом 40 хвилин.

За умови охолодження ковша протягом 60 хвилин температура на межі арматурного та робочого шарів в ківшах без кришок залишалася на відносно сталому рівні (520-630°С для пекоперіклазового футерування та 560-570°С для шамотного). У ківшах із теплоізоляційними кришками ці показники були значно вищими: 650-790°С для пекоперіклазового футерування та 640-650°С для шамотного. На межі теплоізоляційного шару і броні температура зростала зі 140 до 170-180°С незалежно від типу футерування чи використання кришок.

Запровадження високотемпературного нагріву з подальшим накриттям ковша фунтованою кришкою до моменту початку зливу металу із мартенівської печі дозволило суттєво скоротити теплові втрати металу під час випуску плавки. У випадку використання попередньо нагрітих ковшів без знімної теплоізоляційної кришки середнє зниження температури від початку випуску плавки до завершення продувки аргоном становило 55-60°С, що практично дорівнювало втратам тепла при традиційній технології роботи ковшів без додаткового нагріву. Застосування знімної теплоізоляційної кришки суттєво покращило ситуацію, скоротивши втрати температури сталі до рівня 35-45°С. Це зробило можливим додаткове зменшення початкової температури металу перед випуском плавки в конвертері на 10-20°С, завдяки чому вдалося досягти економії чавуну в обсязі 6-12 кг на тонну сталі.

Наявність кришки сприяла зменшенню втрат температури металу під час розливання (зафіксовано за допомогою оптичного пірометра). Під час розливання металу без ковшових кришок середні втрати температури становили 30–40 °С, тоді як при використанні кришок ці втрати знизилися до 10–15 °С.

Для ковшів із футеруванням, прогрітим до 600–1000 °С, стійкість основних вогнетривів досягала 23–40 заливок, а для шамотних — лише 10–11. При цьому стійкість шамотного футерування не зазнала змін навіть при інтенсивному нагріванні високотемпературним режимом. Встановлено, що підвищення стійкості основного футерування забезпечується прискоренням обігу ковша, оскільки це дозволяє зменшити теплові втрати вогнетривів і мінімізувати температурні коливання на їхній поверхні.

Розроблено оптимальний цикл переміщення сталерозливного ковша при роботі з футеруванням в умовах високих температур (рис. 3.9). Після того як футерування нагрівається до 1100–1200 °С, ковш за допомогою крана встановлюється на сталевоз, що переміщується до конвертера.

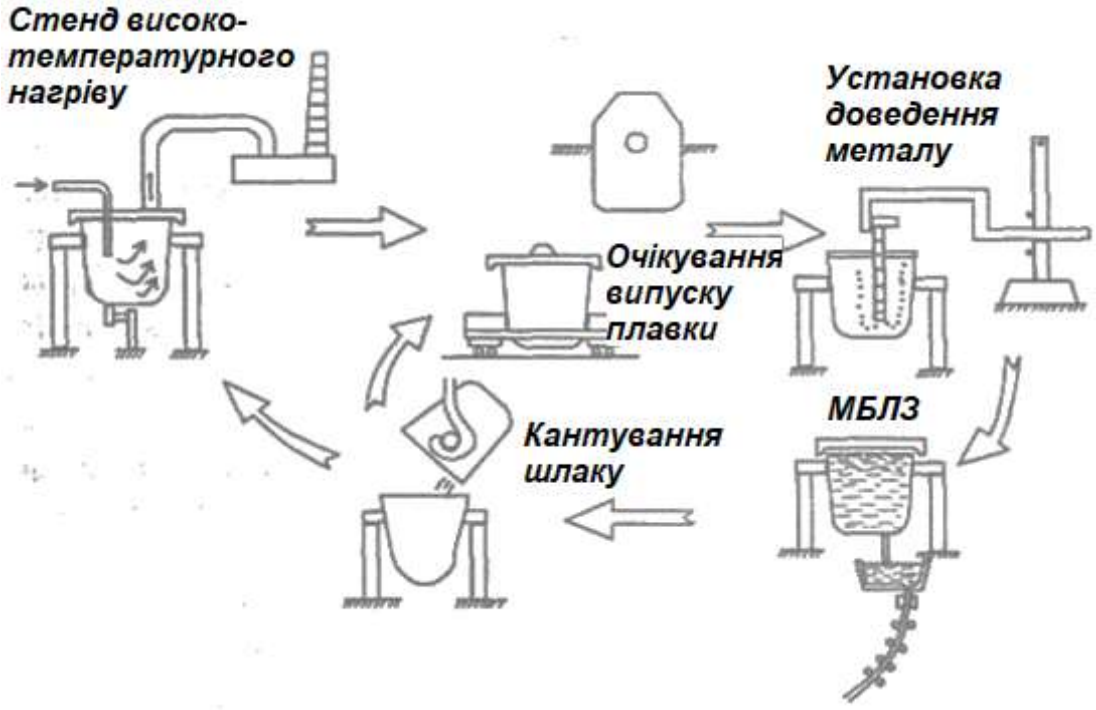


Рисунок 3.9 – Перспективна схема високотемпературної експлуатації футерування сталерозливного ковша на комбінаті "Азовсталь"

Сталевоз переміщується під конвертерний майданчик до спеціального механізму вертикального переміщення, за допомогою якого ківш накривається футерованою кришкою. У такому положенні ківш залишається до моменту випуску плавки. Безпосередньо перед випуском кришка з ковша знімається. Під час транспортування на установку доводки металу (УДМ) і виконання операцій

ковшової обробки, а також при передачі на машині безперервного лиття заготівок (МБЛЗ) використання кришки для ковша не передбачене, оскільки на цих етапах втрати тепла через відкриту поверхню футеровки є мінімальними. На МБЛЗ ківш знову накривається футерованою кришкою за допомогою розливального крана, після чого, для проведення розливання сталі, ця кришка знімається.

Якщо другий шиберний затвор залишився невикористаним, ківш повертають під конвертерний майданчик і накривають кришкою. У разі необхідності виконання робіт зі встановлення шиберних затворів, заміни сталерозливних стаканів або механізованої подачі теплоізолюючого засипання в канал стакана, ківш на сталевозі переводять у ковшове відділення й встановлюють на стенд високотемпературного нагріву футеровки. На цьому стенді всі операції проводяться зовні ковша після його накриття.

Після завершення зазначених робіт вимірюється температура футеровки ковша. У разі потреби футеровку підігрівають до температури 1100-1200°С. Якщо температура футеровки підготовленого ковша перебуває у встановлених параметрах, його можна подавати для прийому плавки без додаткового підігріву.

Для виключення робіт із набивання гнізда сталерозливного стакана та встановлення кесона в ковші, що спричиняють значне охолодження (300-500°С) внутрішньої поверхні футеровки, було проведено промислові випробування складових гніздових периклазохромистих виробів. Їх стійкість становила 10-30 розливів.

Здійснено оцінку зниження температури внутрішньої поверхні футеровки в різні етапи технологічного циклу експлуатації сталерозливного ковша (рис. 3.10).

Вимірювання температури проводилися в зоні шлакового поясу. Найбільші втрати тепла під час експлуатації ковша без кришки спостерігалися під час заміни шиберних вузлів. Температура футеровки ковша через 1,5, 2 та 4 години після завершення розливання становила відповідно 700, 500 та 300°С.

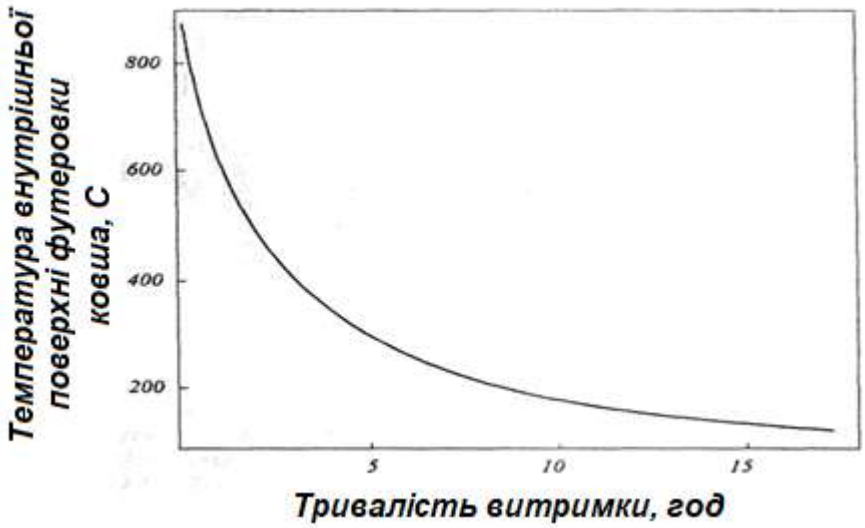


Рисунок 3.10 – Залежність температури внутрішньої поверхні футерування ковша ($t_ф$) без кришки від тривалості витримки після закінчення розливання (τ)

Це підтверджує необхідність виконання всіх робіт із заміни розливних вузлів і засипки каналу сталерозливної склянки на спеціалізованому стенді. Даний стенд повинен бути обладнаний футерованою кришкою, маніпуляторами для заміни шиберних затворів, механізмами для вилучення склянки, а також пристроями для подачі теплоізолюючої засипки зовні ковша.

Замір температури через 10-30 хвилин після закінчення розливання сталі виявив, що внутрішня поверхня вогнетривів ковша, накритого кришкою протягом процесу, на 160-250°С тепліша, ніж у ковша без кришки (відповідно до даних рисунка 3.10).

Аналіз результатів 92 дослідних та 78 контрольних плавок вуглецевої й низьколегованої сталі показав, що при використанні ковша з кришкою температура металу знижувалася на 5-10°С менше порівняно зі стандартною технологією. Нова технологія сприяла покращенню розливності сталі: кількість плавок зі затяжкою каналу склянки зменшилася з 95% до 25% при роботі зі сталлю нижче допустимої температури за технологічними нормами.

Дослідження, спрямовані на розроблення оптимальних технологічних схем та оцінку ефективності високотемпературної експлуатації футеровки сталерозливних ковшів об'ємом 250 тонн, були проведені із застосуванням двох

реконструйованих сушильних стендів і футерованої знімної кришки, виготовленої зі штампованого днища сталерозливного ковша об'ємом 300 тонн.

Процес сушіння та розігрівання нової кислої (кварцеглинистої) та основної (магнезіально-хромистої) набивної футеровки ковшів до температури 810-930°С тривав від 20 до 30 годин. Використання знімної теплоізоляційної кришки на етапах очікування випуску плавки з конвертера, під час розливання сталі та в процесі заміни шиберного пристрою дозволило утримувати температуру футеровки ковша між плавками на рівні 800-1120°С, порівняно з 500-600°С у звичайному режимі експлуатації.

Водночас встановлено, що монтаж і демонтаж кришки потребує виконання семи операцій із залученням крана (згідно з даними рисунка 3.11), що спричиняє додаткові витрати часу — до 24 хвилин за один робочий цикл ковша. Це створює певні труднощі в організації роботи на розливних прольотах цеху.

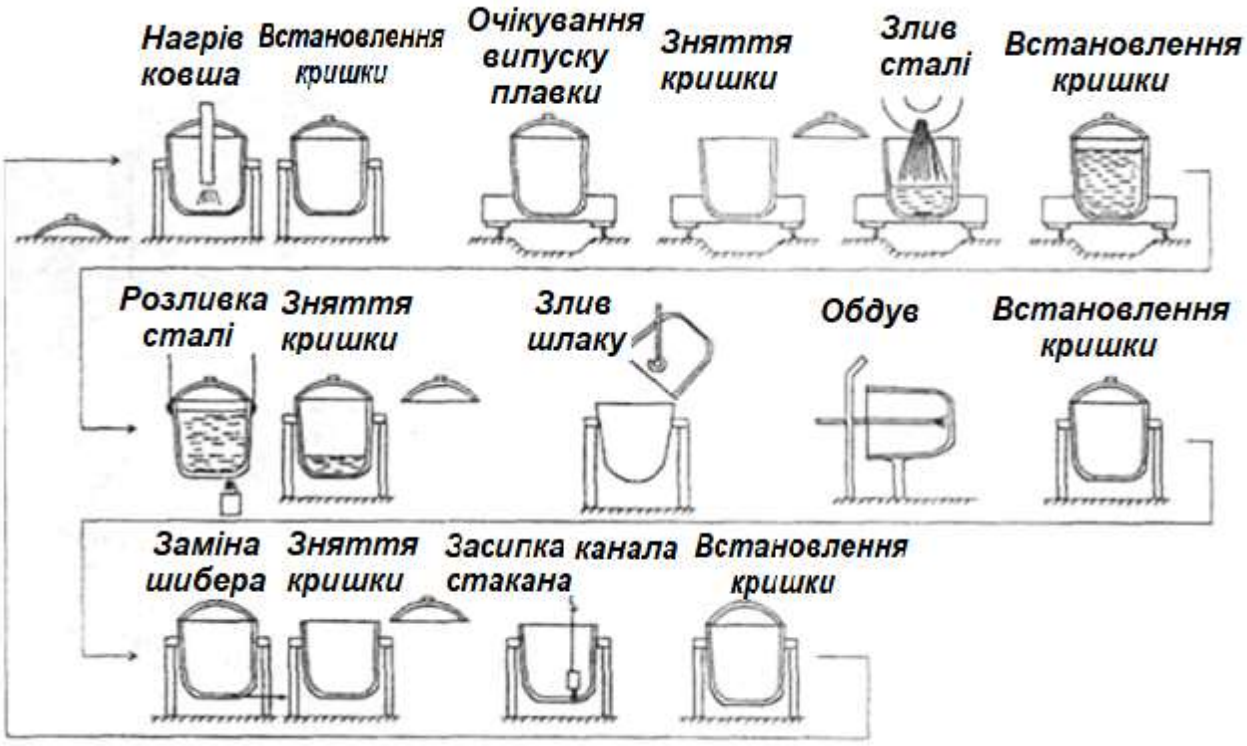


Рисунок 3.11 – Схема технологічних операцій із накриття ковша знімною футерованою кришкою нарізних етапах циклу обороту ковша при розливанні сталі у виливниці

Інститут вогнетривів розробив конструкцію полегшеної переносної зварної футерованої кришки вагою до 3 тонн. Вона оснащена легковагими вогнетривкими матеріалами та спеціальним механізмом для постійного транспортування за допомогою розливного крану. Така конструкція дозволяє мінімізувати витрати часу на операції з кришкою, скорочуючи їх тривалість до 2 хвилин за цикл.

У ході серії дослідно-промислових плавок спокійної, напівспокійної та киплячої сталі встановлено, що перехід від традиційного режиму експлуатації кислого футерування до високотемпературного забезпечує зменшення охолодження металу під час його зливу з конвертера. Якщо раніше це охолодження становило 50-70°С, то тепер воно знижене до 20-60°С, тобто зменшення склало 20-30°С.

Експериментальний режим високотемпературної експлуатації ковшів включав кілька ключових етапів. По-перше, це була сушка і розігрів нового футерування до температури 860-930°С на спеціальних високотемпературних стендах. По-друге, використання знімної футерованої кришки на ковші під час очікування випуску плавки з конвертера, у процесі розливання металу та під час зміни шиберного пристрою. Також важливим моментом стало використання високоміцних корундових підгніздових і гніздових цеглин та прискорення оборотності ковшів, завдяки підтриманню температури футерування не нижче 800°С протягом усього циклу роботи.

Застосування такого режиму дозволило значно зменшити заростання основного футерування ковшів і мінімізувати накопичення відкладень у каналі сталерозливної склянки. Разом із цим зношуваність основного футерування зменшилася, тоді як стан кислого футерування залишився незмінним. У результаті середній показник стійкості основного футерування ковшів зріс до 26 циклів наливу.

Під час дослідно-промислових плавок низьколегованої сталі було проведено вимірювання температури струменя металу оптичним пірометром на початку та наприкінці розливання плавки з ковшів, накритих футерованою пере-

носною кришкою. Температура футерування ковшів перед випуском плавок із конвертера варіювала в межах 860–1050°С. У ході досліджень встановлено, що зниження температури металу під час розливу сталі при використанні таких ковшів становить лише 10–15°С, тоді як за традиційного підходу— 25–30°С. Це сприяло стабілізації температури металу протягом усього процесу розливання, покращивши загальні технологічні умови цього етапу.

Зменшення коливань температури металу між окремими плавками та впродовж розливання дозволило значно знизити ймовірність утворення тріщин у злитках спокійної сталі. До цього додалася підвищена стабільність закупорювання злитків. Якість зливків спокійної сталі поліпшилася рівномірно як для плавок з кислою футеровкою, так і для плавок з основною. Завдяки цьому рівень відсортування заготовок після вогневої зачистки зменшився на 1–2%.

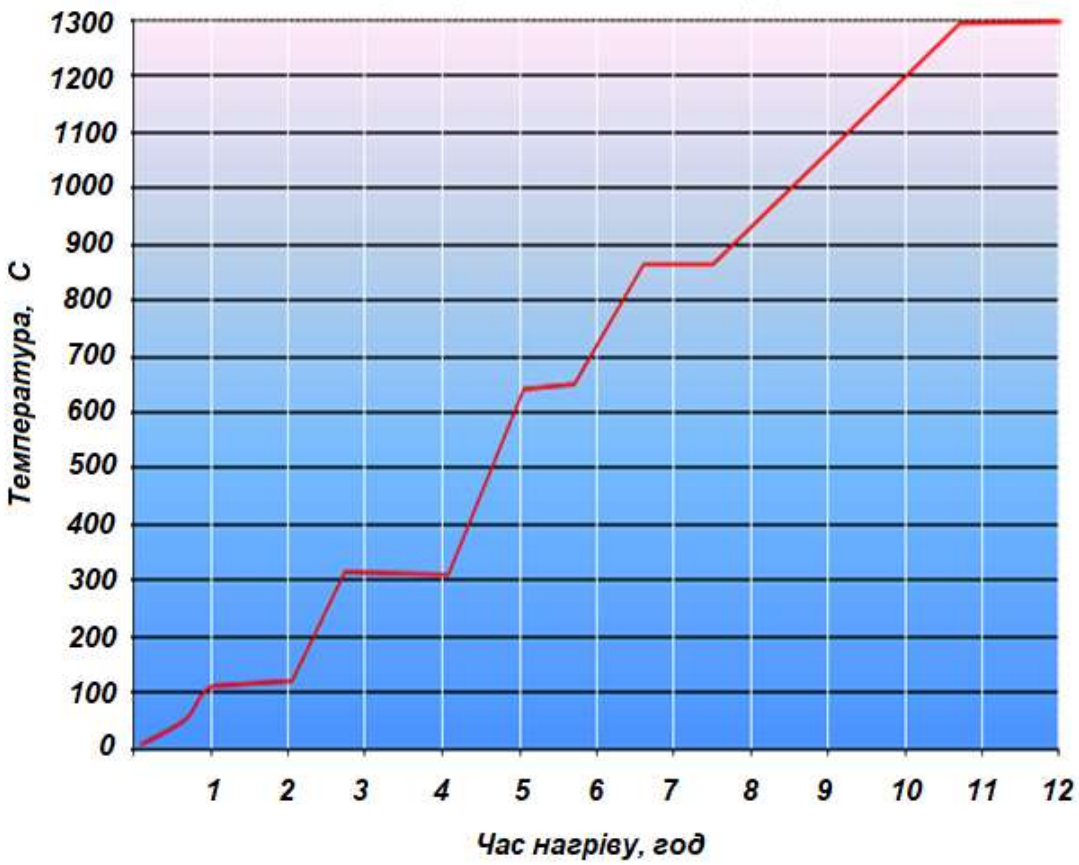


Рисунок 3.12 – Нагрів сталерозливних ковшів з основної футеровкою

Таким чином, експлуатація сталерозливних ковшів при температурах вогнетривкого шару не нижче 800°С протягом усього їхнього циклу використання сприяє суттєвому скороченню теплових втрат сталі під час її випуску з агрегату

та розливання. Водночас це забезпечує високу стійкість футерування ковшів і сприяє ресурсозбереженню у сталеплавильному виробництві.

На основі отриманих результатів дослідно-промислових робіт на кількох металургійних підприємствах, а також урахування міжнародного досвіду була розроблена оптимальна технологія високотемпературної експлуатації сталерозливних ковшів (рис. 3.12).

3.4 Магнезіальні вогнетривкі бетони на основі лужних в'язких з підвищеними термомеханічними властивостями

Розвиток технологій металургійного виробництва стимулює вдосконалення технологій створення вогнетривких матеріалів, а також пов'язаних із ними процесів облаштування та експлуатації футеровки теплових агрегатів. Підвищення інтенсивності процесів виплавки, позапічної обробки і розливання сталі, поєднане з необхідністю покращення її якості, вимагає більшої надійності футерування при мінімізації витрат на вогнетривкі матеріали на тонну металу. У таких умовах для виробників вогнетривів особливо важливим є розроблення нових матеріалів із покращеними термомеханічними властивостями, які допоможуть зменшити виробничі й енергетичні витрати споживачів та забезпечити високу якість металопродукції.

Останні десятиліття характеризуються глобальною тенденцією до збільшення частки неформованих вогнетривких матеріалів і виробів із вогнетривких бетонів. У Сполучених Штатах і країнах Євросоюзу на сьогодні близько 45-60 % від загального обсягу застосованих вогнетривів припадає саме на високоякісні неформовані матеріали. У Японії частка таких матеріалів досягла 68 % у 2022 році.

Інновації у виготовленні неформованих вогнетривких матеріалів і вдосконалення методів нанесення футеровки, таких як саморозтікання, торкретування та шоткретування, особливо із застосуванням низько-, ультранизько- та безцементних вогнетривких бетонів, дозволяють суттєво зменшити капітальні

витрати, витрати на обладнання та енергоефективність їх виробництва. Висока термомеханічна стійкість таких матеріалів також сприяє зменшенню товщини шарів футеровки, що дозволяє збільшувати місткість сталерозливних ковшів і, як наслідок, підвищувати продуктивність металургійних процесів.

Магнезіальні матеріали є одним із ключових і перспективних видів вогнетривких матеріалів у сучасній промисловості. Завдяки своїм властивостям вони належать до найвищої категорії жаротривкості серед доступних матеріалів. Основними видами магнезіальних вогнетривів є периклазові матеріали, створені на основі периклазу або шпінелі. За останні 10-15 років частка магнезіальних матеріалів у загальному обсязі вогнетривкого виробництва зросла з 20 % до 25 %. Це пояснюється тим, що периклаз та шпінель не зазнають суттєвих модифікаційних змін при нагріванні, демонструють ізотропне теплове розширення, а також вирізняються високою хімічною стійкістю до агресивного впливу розплавлених металів і основних шлаків.

У зв’язку з високим і нерівномірним коефіцієнтом лінійного температурного розширення (у межах температури 25–1000 °С середній коефіцієнт становить $\alpha = 13{,}5 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$, при 1000–1200 °С — $\alpha = 22{,}5 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$, а при 1200–1500 °С — $\alpha = 20{,}0 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$), а також через невисоку теплопровідність і обмежену міцність при підвищених температурах, периклазові вогнетриви характеризуються низькою термостійкістю. Проте цей показник суттєво покращується при переході від периклазових до шпінельних вогнетривів. Шпінельні вогнетриви переважно складаються зі сполук типу $MgO \cdot R_2O_3$, де R — Al або Cr.

Алюмомагнезіальна шпінель має температуру плавлення 2105 °С. З периклазом вона утворює міцний прямий зв’язок у вигляді контактів із частковим проростанням, що забезпечує високу щільність та надійність зчеплення. Водночас шпінель демонструє високу сумісність із корундом, створюючи з ним тверді розчини в широкому діапазоні їх складу. Це призводить до утворення евтектики, яка при вмісті 98,2% Al_2O_3 плавиться за температури 1920 °С.

Висока термостійкість шпінелі, порівнянна з термостійкістю стандартного шамоту, зумовлена низьким коефіцієнтом лінійного температурного розши-

рення ($5{,}9 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$). До того ж шпінель відома своєю високою стійкістю до корозії під дією розплавлених металів, шлаків та оксидів заліза. На відміну від периклазових вогнетривів, шпінельні матеріали стійкі до гідратації водою і не потребують спеціальних заходів для гідроізоляції під час зберігання.

Дослідження також підтвердили, що з тонкодисперсного периклазу, змішаного з рідким склом, можливо виготовити в'яжучі матеріали із нормальною здатністю тверднути, показники активності яких становлять 9–19 МПа після пропарювання. При сушінні отриманого цементного каменю до постійної маси за температури 110 °С його міцність зростає до 15–46 МПа. Додавання порошків мулітокорунду чи корунду (з вмістом відповідно 96,9% та 92,2% Al_2O_3) дозволяє отримати шпінельні в'яжучі матеріали з міцністю в затверділому стані від 7 до 39 МПа, яка після сушіння може досягати 15–78 МПа.

Одним із завдань дослідження було визначити вплив температури нагрівання та кількості структуруючих добавок на міцнісні характеристики і лінійні температурні деформації магнезіальних в'яжучих каменів. На основі отриманих матеріалів проводилася розробка магнезіальних бетонів на шпінельній основі із впровадженням додаткових домолотих технічних глиноземних добавок для підвищення їх високоглиноземистих властивостей.

Як структуроутворюючі компоненти і мікронаповнювачі у складі в'яжучих використовувались тонкодисперсні матеріали із залишковим вмістом часток на ситі 0,08 мм у межах 1,1–8,7%. Серед високоглиноземистих мікронаповнювачів застосовували технічний глинозем із вмістом 99,6% Al_2O_3, а також корунд та мулітокорунд. Спечений периклаз містив 96,8% MgO. В якості заповнювачів використовували фракції 0,16–5 мм і 5–10 мм, отримані зі спеченого периклазу.

Властивості каменю з використанням в'яжучих аналізувалися на зразках розміром 2×2×2 см, виготовлених із тіста нормальної густоти. Зразки підігрівали в електропічках із нагрівачами з ніхрому або карбіду кремнію зі швидкістю нагрівання 200±20 °С/год. Після досягнення контрольної температури матеріал витримували при ній протягом 4 годин, а потім охолоджували разом із піччю.

Міцність на стиск у холодному стані визначали відповідно до стандарту ГОСТ 10180-90 при фіксованій швидкості навантаження. Лінійні температурні деформації каменю в'яжучих досліджували за допомогою дилатометра з кварцовою стрижневою передачею.

Бетонні зразки у формі кубів розміром 7 см виготовляли способом вібропресування із сумішей з рухливістю 1–2 см. Сформовані зразки затвердівали протягом 28 діб за нормальних умов, після чого їх висушували до постійної маси при температурі 105–110 °С. Подальше нагрівання виконувалось зі швидкістю 200±20 °С/год із витримкою при заданих температурах упродовж 4 годин. Охолодження також здійснювалося у вимкненій електропечі разом із зразками.

3.4.1 Дослідження властивостей в'яжучих

Результати дослідження впливу температури нагрівання на міцність в’яжучих наведені у таблиці 3.5.

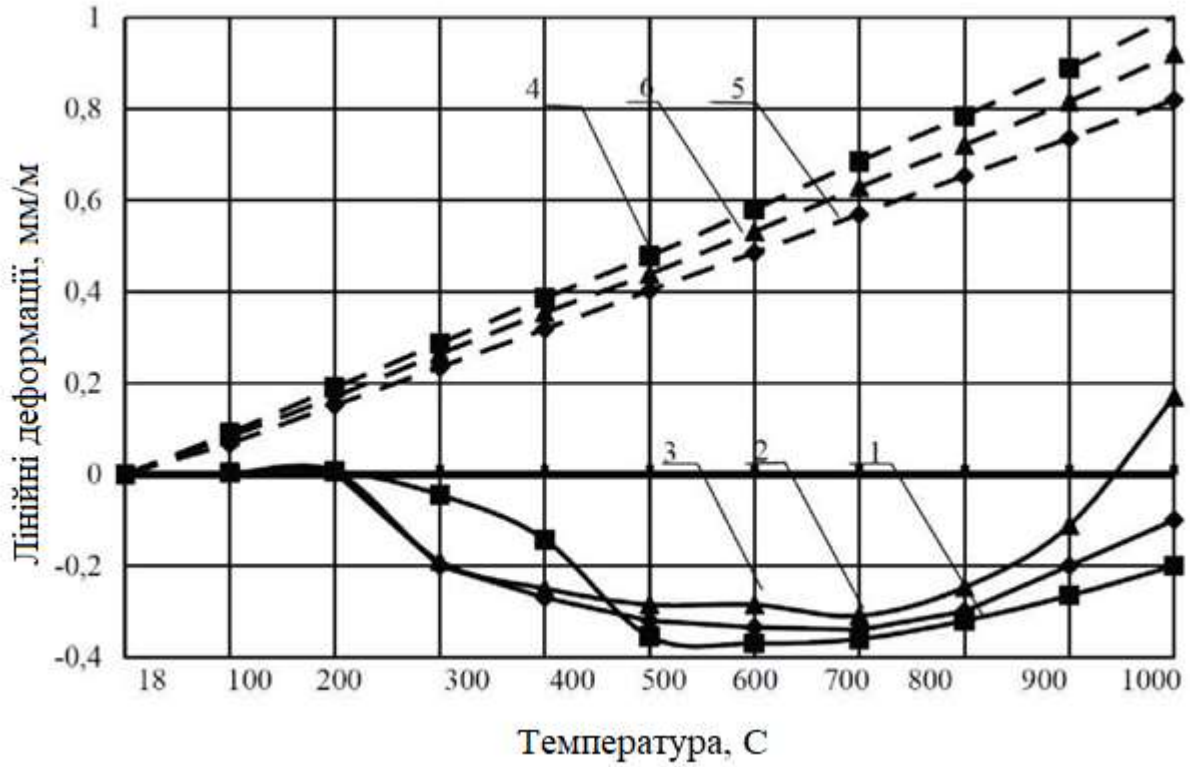
Таблиця 3.5 – Залежність міцності ($R_{сж}$) магнезіальних в'яжучих від температури прогріву і кількості добавок, що структурують

№ пп	Склад порошкової частини в'яжучих, %	$R_{сж}$, МПа після прогріву при температурі, °С					
1	периклаз	55,0 100	37,9 69	48,9 89	51,1 93	58,9 107	93,2 169
2	периклаз + глинозем	26,7 100	29,9 112	27,8 104	19,0 71	64 24	4,8 18
3	периклаз + алюмосилікат	30,7 100	36,2 118	33,6 109	25,4 83	15,3 50	12,0 43

Дослідження виявили, що нагрівання до 600 °С призводить до значного розм'якшення каменю в'яжучого, створеного на основі периклазу. Зі збільшенням температури випалу міцність каменю на рідинноскляному в'яжучому (склад 1) постійно зростає, досягаючи 169% міцності висушених зразків після

теплової обробки при 1400 °С.

Дослідження лінійних деформацій каменю магнезіальних в'яжучих на основі високомодульного рідкого скла демонструють, що при нагріванні до 200 °С температурне розширення перевищує усадку зразків. Проте подальше підвищення температури спричиняє істотне скорочення каменю, яке при досягненні 500 °С становить 0,28…0,36%.



1 - периклаз, перше нагрівання; 2 - периклаз + алюмосилікат, перше нагрівання; 3 - периклаз + глинозем, перше нагрівання; 4 - периклаз, друге нагрівання після випалу при 1400 ° С; 5 - периклаз + алюмосилікат, друге нагрівання після випалу при 1400 ° С; 6 - периклаз + глинозем, друге нагрівання після випалу при 1400 °С.

Рисунок 3.13 – Залежність лінійних температурних деформацій магнезіальних в'яжучих на рідкому склі від температури прогріву

За подальшого підвищення температури магнезіальні в'яжучі демонструють характер деформації, що суттєво відрізняється від поведінки високоглиноземних композицій. Якщо останні в діапазоні температур 700–1000 °С зазнають значного скорочення, то магнезіальні матеріали, навпаки, схильні до розширен-

ня. Це розширення поступово зростає при переході від периклазового в'яжучого до складів із додаванням алюмосилікатів та глинозему. Як зазначалося раніше, це явище пов’язане з формуванням менш щільних сполук, таких як натрій-магнієві силікати, форстерит і магнезіальна шпінель, замість вихідних високощільних периклазу, алюмосилікатів і глинозему.

У композиціях на основі периклазу з додаванням рідкого скла утворення таких продуктів перекристалізації є мінімальним, що зумовлює значно менший рівень розширення.

3.4.2 Дослідження властивостей магнезіальних бетонів

Дослідження впливу додавання технічного глинозему до в'яжучого на міцність і термостійкість бетону з периклазовими заповнювачами (табл. 3.6 і 3.7) виявили, що через 28 діб зразки демонструють достатню початкову міцність у межах 13,9–22,5 МПа. При введенні та збільшенні вмісту тонкомолотого глинозему спостерігається зниження міцності бетонів звичайного твердіння.

Однак подальше сушіння при температурі 110 °С сприяє зростанню міцності зразків, причому цей ефект посилюється зі збільшенням кількості технічного глинозему у складі в'яжучого. Після випалу при температурі 800 °С залишкова міцність К800/К110 бетонів становить від 32 до 44%, при цьому показники значно покращуються в композиціях із додаванням глинозему. У той же час після нагрівання до температури 1400 °С залишкова міцність периклазового бетону досягає 60% і перевищує аналогічні показники для бетону зі шпінельним зв'язуванням. Проте навіть у випадку зі шпінельним з'єднанням міцність зростає порівняно з випалюванням при 800 °С і становить у межах 47–55%.

На відміну від каменю в'яжучих, зниження міцності бетонів у температурному діапазоні від 800 до 1400 °С, ймовірно, пов'язане з порушенням суцільності керамічної матриці в'яжучого. Ця матриця формується наново та зазнає значного усадження навколо зерен попередньо спечених заповнювачів, які зазнають лише нагрівання без додаткових реакцій.

Таблиця 3.6 – Склади магнезіальних бетонних сумішей

№ пп	Витрата матеріалів, %				
	дисперсні		периклаз		розчин $Na_2O \cdot 2,9SiO_2$ щільністю 1,30 г/см^3 (понад 100 %)
	периклаз	глинозем	0,16 ... 5 мм	5...10 мм	
1	25	-	37,5	37,5	11,0
2	16,7	8,3	37,5	37,5	11,6
3	12,5	12,5	37,5	37,5	12,4

Таблиця 3.7 – Вплив температури прогріву на міцність (R) та термостійкість магнезіальних бетонів

№№ складів за табл. 2	$R_{сж}$ (МПа – чисельник, % – знаменник) після прогріву при температурі, °С				Термостійкість у циклах водних теплозмін 800↔20 °С (після прогріву при: 800 °С - чисельник, 1400 °С - знаменник)
	20	110	800	1400	
1	22,5	25,7	82	15,4	7
	88	100	32	60	12
2	18,4	27,7	12,2	13,0	12
	66	100	44	47	16
3	13,9	43,5	17,4	23,9	14
	32	100	40	55	18

У результаті проведених досліджень було розроблено лужні в'яжучі матеріали периклазового та шпінельного складу з використанням водних розчинів натрієвих силікатів. Як наповнювачі та структуроутворюючі компоненти запропоновано застосовувати вогнетривкі мінеральні матеріали. Досліджено фізико-механічні властивості магнезіальних в'яжучих при нагріванні, що дозволило встановити механізми твердіння. Виявлено, що у в'яжучих на основі периклазу, розведеного рідким склом, процес твердіння відбувається завдяки утворенню $Mg(OH)_2$ та гелеподібного натрієво-магнієвого гідросилікату, які забезпечують гідравлічну властивість матеріалу.

При середніх температурах 600–900 °С аморфні продукти твердіння за-

знають структурного упорядкування, і в цей процес залучаються раніше інертні наповнювачі. Взаємодія новоутворених сполук із більш вогнетривкими наповнювачами призводить до формування керамічного зв'язку з тугоплавкими і вогнетривкими кристалічними компонентами, що сприяє ущільненню матеріалу, підвищенню міцності й зменшенню відкритої пористості в'яжучого каменю.

Також були досліджені властивості вогнетривких бетонів на периклазових заповнювачах зі шпінельною зв'язкою, де використовували домелений технічний глинозем як високоглиноземисту добавку. Встановлено, що бетони на периклазовій зв'язці мають порівняно низьку термічну стійкість. Застосування шпінельної зв'язки покращує цей показник у 1,5–2 рази, що обумовлено не лише збільшенням залишкової міцності матеріалу, але й, ймовірно, зниженням коефіцієнта його лінійного температурного розширення.

3.5 Дослідження фазового складу та властивостей низькоцементних магнезіальних бетонів

Використання монолітного футерування на основі магнезіальних бетонів для шлакового поясу сталерозливного ковша демонструє суттєву економічну перевагу порівняно з периклазовуглецевими формованими виробами, що застосовуються нині. Процес виготовлення такого футерування майже повністю механізований, забезпечуючи підвищення ефективності виробництва.

Завдяки виключенню етапів формування й термообробки значно скорочуються енергетичні витрати, а також витрати на використання коштовного вуглецю. Це робить енерго- та ресурсозбереження у виробництві магнезіального бетонного футерування ключовим напрямом розвитку не лише вогнетривкої промисловості, а й металургії загалом.

У процесі виробництва використовували такі вихідні матеріали: плавлений периклаз марки DTMF 90 фракцій 3-1 мм; 1-0,5 мм; 0,063 мм; високоглиноземний цемент марки CA-270; диспергуючі добавки марок M-ADS і M-ADW. Зразки створювали методом віброзаливки у розбірні металеві форми відповідно

до вимог стандарту ГОСТ Р 52541-2006. Для приготування бетонної суміші перш за все змішували сухі компоненти, після чого додавали воду. Уся суміш готувалася в лабораторному змішувачі «Founter VFM7B» протягом 5–7 хвилин. Індекс розтікання отриманої бетонної суміші складав 140 мм.

Готові зразки витримували у формах 24 години, після чого розпалублювали й додатково утримували у вологих умовах ще протягом 48 годин. Після випалу визначали щільність матеріалу, відкриту пористість, а також оцінювали зміни лінійних розмірів. Крім того, було проведено рентгенофазовий аналіз виготовлених зразків. Детальні результати досліджень наведені у таблицях 3.7 та 3.8.

Таблиця 3.7 – Фазовий склад зразків

Фази	Вміст, мас. %, після термообробки при °С			
	без т. о.	110	600	1100
MgO	94	96	99	98
$Mg(OH)_2$	0,7	0,35	0,07	-
$Ca_2Al_2O_5 \cdot 8H_2O$	1,6	0,8	0,1	-
$CaAl_4O_7$	1,2	0,5	0,39	-
$CaAl_2O_4$	2,7	1,7	0,37	0,3
$Ca_3A1_2(OH)_{12}$	-	0,6	-	-
$Al(OH)_3$	-	0,38	-	-
Al_2O_3	-	-	0,31	0,8
$MgAl_2O_4$	-	-	-	1,0
$Ca_{12}Al_{14}O_{33}$	-	-	-	0,2

Таблиця 3.8 - Властивості отриманих зразків

Температура термообробки, °С	Значення			
	Водопоглинання, %	Відкрита пористість, %	Здається щільність, г/см^3	Межа міцності при стисканні, МПа
без т. о.	2,25	8,4	2,98	40,8
110	3,5	13	2,95	50,2
600	4,7	17	2,90	32,2
1100	5,5	20,1	2,90	15,6

Дослідження показали, що вміст фази $Mg(OH)_2$ за будь-якої температури не перевищує 0,7 мас. % і не здатен суттєво впливати на довговічність бетону. Керамічні властивості зразків, які не піддавалися термообробці, а також тих, що висушувалися за температури 110 °С, за своїми показниками відповідають алюмосилікатним бетонам. У процесі термообробки при температурах понад 600 °С відбувається руйнування кристалогідратів цементу. Це супроводжується збільшенням відкритої пористості та зниженням міцності бетону, що свідчить про відсутність спікання у матеріалі. Додатково до цього відбувається процес шпінелеутворення (див. табл. 3.7), який супроводжується розширенням об’єму кристалічної структури.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок про можливість подальшого вдосконалення характеристик магнезіальних бетонів, орієнтуючись на покращення їхніх фізичних властивостей.

Подальші дослідження мають бути сконцентровані на застосуванні реологічних добавок на основі SiO_2 (зокрема SiO_x або їх аналогів), оцінці доцільності використання традиційних спекаючих добавок для периклазових вогнетривів з метою забезпечення спікання бетону в діапазоні температур 600-800 °С, впровадженні алюмомагнезіальних цементів, а також розробці нових реологічних добавок, які сприятимуть покращенню рухливості сумішей периклазового бетону.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Загальні вимоги щодо створення безпечних умов праці

Всі вимоги стосовно інструкцій з охорони праці, цивільного захисту, пожежної безпеки та дій у надзвичайних ситуаціях мають бути зафіксовані в «Журналі реєстрації інструктажів з питань охорони праці на робочому місці» та в «Журналі реєстрації інструктажів з питань цивільного захисту, пожежної безпеки та дій у надзвичайних ситуаціях».

Працівник несе відповідальність за дотримання особистої безпеки та здоров’я, а також за забезпечення безпеки оточуючих під час виконання своїх робочих обов’язків або перебування на території підприємства. Він має знати й дотримуватись норм законодавства та внутрішніх організаційних документів підприємства з питань охорони праці, а також правильно поводитися з обладнанням, механізмами, устаткуванням та іншими засобами виробництва. Зобов’язанням працівника є обов’язкове використання засобів колективного та індивідуального захисту.

Також необхідно застосовувати всі встановлені технічні та організаційні заходи для мінімізації виробничих ризиків, чітко виконувати норми та правила, передбачені колективним договором і внутрішнім трудовим розпорядком.

Працівник має своєчасно проходити як первинні, так і періодичні медичні огляди, сприяти керівництву у створенні безпечних і нешкідливих умов праці та особисто вживати всіх доступних заходів для запобігання будь-яким небезпечним або шкідливим виробничим ситуаціям. У разі виникнення загроз життю чи здоров’ю інших людей або шкоди навколишньому середовищу працівник зобов’язаний негайно повідомити про це своєму безпосередньому керівнику чи відповідній посадовій особі.

4.2 Утворення шкідливих речовин та чинників при технологічних процесах виробництва

Основними небезпечними хімічними речовинами, що застосовуються в технологічних процесах на підприємстві, є:

• виробничий пил, до складу якого входять діоксид кремнію, оксид магнію, оксид хрому, оксид алюмінію;

• хлорид водню; • ортофосфорна кислота;

• фенол;

• зварювальні аерозолі.

Для випалу сировини та виробів у печах використовується природний газ. Газополум'яна обробка металів здійснюється із застосуванням ацетилену та пропану. У випадках неповного згоряння палива й інших матеріалів утворюються монооксид вуглецю (чадний газ) і діоксид вуглецю (вуглекислий газ).

Окрім хімічних чинників, на окремих етапах виробництва працівники можуть зазнавати впливу таких несприятливих факторів, як виробничий шум, вібрація та інфрачервоне випромінювання.

Виробничий пил є одним із найпоширеніших шкідливих факторів, що негативно впливає на здоров'я працівників. Багато технологічних процесів супроводжуються утворенням дрібнодисперсних частинок твердих речовин, які потрапляють у повітря робочої зони виробничих приміщень.

Вплив пилу на організм може стати причиною професійних захворювань, таких як пневмоконіози, алергічні реакції, хронічні захворювання органів дихання, а також захворювання очей і шкірних покривів.

Діоксид кремнію (SiO_2) входить до складу вогнетривких матеріалів, таких як шамот каоліновий, глина тощо.

Однією з основних властивостей двоокису кремнію є його здатність спричиняти професійні захворювання легень, серед яких найчастіше діагностують пневмоконіози. Найпоширенішим і найважчим з них є силікоз.

Оксид магнію (хімічна формула – MgO) міститься у магнезиті, який широко використовується для виробництва вогнетривких матеріалів. Висока концентрація магнезитового пилу в повітрі може викликати подразнення слизової оболонки верхніх дихальних шляхів. Крім того, оксид магнію спричиняє слабке подразнення слизової оболонки очей і носа.

Оксид хрому (хімічна формула – Cr_2O_3) є одним із компонентів хромової руди, що застосовується у виробництві вогнетривів. Високі концентрації цього оксиду в повітрі можуть спровокувати кашель, задишку та розвиток бронхіту. Окрім цього, контакт із шкірою призводить до появи хромових дерматитів, які найчастіше виникають у зоні кистей рук, передпліч, обличчя, зокрема на повіках.

Оксид алюмінію (хімічна формула – Al_2O_3) зазвичай використовується у виробництві вогнетривких матеріалів. Вдихання пилу цього оксиду викликає ураження легень, захворювання називається алюмінозом. Крім того, цей пил подразнює слизові оболонки очей, носа і ротової порожнини. При попаданні на шкіру може викликати свербіж, розвиток екзем або дерматитів.

Хлористий водень (хімічна формула – HCl), який трапляється на робочих місцях термістів при роботі з соляними ваннами в ремонтно-механічних цехах, є безбарвним газом із різким запахом, що важчий за повітря. Він активно реагує з окисниками, утворюючи токсичний газ (хлор). У присутності води хлористий водень вступає в реакцію з багатьма металами, виділяючи горючий і вибухонебезпечний газ – водень. Його дія на організм характеризується подразненням і задухою. Газ провокує печіння дихальних шляхів, викликає кашель, утруднене дихання, задишку та біль у горлі. При контакті зі шкірою чи слизовими оболонками очей він спричиняє опіки, болісні відчуття та, при потраплянні в рідкому стані, обмороження.

Ортофосфорна кислота (хімічна формула – H_3PO_3), що може бути присутня на робочих місцях у цехах нестандартного виробництва (ЦНВ), представляє небезпеку своїми парами. Її випари викликають атрофічні процеси в слизовій оболонці носа, що може супроводжуватися носовими кровотечами,

сухістю у носоглотці та пошкодженням зубної емалі. При контакті зі шкірою кислота спричиняє опіки та запальні процеси.

Фенол входить до складу бакеліту. Технічний фенол має вигляд червоно-бурої або іноді майже чорної в'язкої рідини з характерним запахом. У разі отруєння його парами спостерігаються подразнення дихальних шляхів, розлади травлення, нудота, ранкове блювання, пітливість, підвищене слиновиділення, свербіж шкіри, дратівливість і безсоння.

Природний газ є сумішшю переважно метану (CH_4, до 98%), а також етану (C_2H_6), пропану (C_3H_8), бутану (C_4H_{10}) та інших вуглеводнів. Він легший за повітря, тому при витоку накопичується у верхніх частинах приміщень, колодязях чи інших ємностях. Властивості природного газу не роблять його безпосередньо токсичним, однак велика концентрація у повітрі може спричинити кисневе голодування і подальше задушення. Газ стає вибухонебезпечним, якщо його концентрація у повітрі становить від 5% до 15%.

Ацетилен (C_2H_2) — це безбарвний газ, легший за повітря, зі слабким запахом. Він чинить токсичну дію на організм людини. При концентрації ацетилену у повітрі від 2,5% до 80% суміш стає вибухонебезпечною.

Пропан (C_3H_8) — це також безбарвний газ із різким неприємним запахом завдяки одоруванню етилмеркаптаном. Він важчий за повітря і має задушливий вплив на людський організм. Газоповітряна суміш із пропаном стає вибухонебезпечною при концентрації від 2% до 9%. Через те, що газ накопичується в низинних місцях, як-от приямки, тунелі, колодязі чи підвали, використовувати його в таких локаціях заборонено.

Під час неповного згоряння палива або інших матеріалів у котлах, двигунах чи інших механізмах виділяється чадний газ (CO). Цей газ є безбарвним і не має запаху, що збільшує його небезпеку для людини. Він токсичний і може спричиняти отруєння, а його висока концентрація (від 12,5% до 80% у повітрі) робить його вибухонебезпечним.

Зварювальні аерозолі містять оксиди заліза, марганцю та кремнію як

основні компоненти. Вдихання цих речовин разом із токсичними газами може негативно позначатися на здоров'ї людини, викликаючи професійні захворювання. Найнебезпечнішими для здоров'я є оксиди марганцю, що пошкоджують нервову систему, легені, печінку та кров; сполуки кремнію, які спричиняють силікоз у разі їх вдихання; хромові з'єднання, які накопичуються в організмі, викликаючи головний біль, анемію й захворювання травного тракту; окис титану, що провокує захворювання легень. Серед найшкідливіших газів, які виділяються під час зварювальних робіт і різання, особливу небезпеку становлять двоокис азоту — причина хвороб легень і серцево-судинної системи; карбон монооксид (CO); а також озон із запахом, схожим на хлор. Останній утворюється під час роботи в інертних газах і призводить до подразнення очей, сухості в роті та болю в грудях.

Основним джерелом шуму на виробництві є механічне обладнання, таке як дробарки, млини, грохоти, бігуни, вентилятори тощо. Шум негативно впливає на організм людини, насамперед на органи слуху, нервову та серцево-судинну системи. Тривала дія інтенсивного шуму може спричинити подразнення клітин слухового аналізатора, їхнє стомлення, а надалі — стійке зниження слуху. Окрім прямого впливу на органи слуху, шум також завдає шкоди іншим системам організму, особливо центральній нервовій системі. Ураження нервової системи внаслідок дії шуму характеризується підвищеною дратівливістю, зниженням пам'яті, апатією, пригніченим настроєм, змінами шкірної чутливості та іншими порушеннями. Крім того, спостерігається уповільнення реакцій психіки та розлади сну.

Шум може також впливати на органи травлення, викликати порушення обмінних процесів і впливати на функціональний стан серцево-судинної системи. Таким чином, тривалий вплив шуму може призвести до розвитку професійної приглухуватості (неврит слухового нерва) у поєднанні з функціональними порушеннями центральної нервової, вегетативної та серцево-судинної систем. Ці зміни можуть бути основою для діагностики професійного захворювання — шумової хвороби.

Джерелами вібрації на підприємствах є транспортери сипучих вантажів, бігуни, грохоти, млини, електролафети, мостові крани та електромотори. Систематична дія загальних вібрацій провокує виникнення вібраційної хвороби — патології, яка проявляється у порушенні фізіологічних функцій організму через ураження центральної нервової системи. Прояви цього захворювання включають головний біль, запаморочення, проблеми зі сном, зниження працездатності, погіршення загального самопочуття і порушення роботи серця.

Джерелами інфрачервоного випромінювання є термічні печі, електропечі та енергія зварювальної дуги. Ступінь фізіологічних змін в організмі під впливом цього типу випромінювання залежить від таких факторів, як його інтенсивність, спектральний склад, площа та локалізація опромінення, тривалість дії, рівень фізичного напруження, а також виробничі мікрокліматичні умови — температура, вологість і швидкість руху повітря.

Гранична переносимість інфрачервоного випромінювання досягається за температури шкіри на рівні 40-45 °С. Воно зазвичай впливає на організм разом із підвищеною температурою навколишнього повітря. У робітників, які працюють в умовах високої температури та вологості середовища, тепловіддача може бути ускладненою, що призводить до перегрівання організму. Такий стан називають гіпертермією, яка характеризується значним підвищенням температури тіла, інтенсивним потовиділенням, головним болем, гарячковим почуттям слабкості, сильною спрагою і порушенням кольоросприйняття. В особливо важких випадках температура тіла може перевищити 41-42 °С, шкіра стає блідою або синюшною, зіниці розширюються, дихання стає частим і поверхневим (50-60 вдихів за хвилину), пульс прискорюється до 120-160 ударів на хвилину, можуть виникати судоми, зниження артеріального тиску та навіть втрата свідомості. Без своєчасної медичної допомоги гіпертермія може закінчитися летально.

Через перегрівання та значну втрату рідини з потом можливе порушення водно-електролітного балансу, що проявляється судомною хворобою.

Основним симптомом цього стану є болючі скорочення м'язів кінцівок із виникненням тонічних судом. Окрім цього, тривале перебування в умовах високої температури може спричинити захворювання нирок, травної системи чи печінки.

Працівники, які довгий час виконують свої обов’язки під впливом інфрачервоного випромінювання, можуть також відчувати порушення у роботі центральної нервової системи. Це проявляється головним болем, розладами сну, подразливістю та загальною слабкістю. Крім того, відзначаються зміни у вегетативній нервовій системі: тремтіння повік і пальців витягнутих рук є одними з найбільш характерних симптомів.

4.3 Заходи з пожежної безпеки

Усі працівники підприємства, незалежно від того, працюють вони постійно чи тимчасово, повинні знати та дотримуватися вимог «Правил пожежної безпеки в Україні» та внутрішніх інструкцій з пожежної безпеки, затверджених на підприємстві та у відповідних виробничих підрозділах. Співробітники зобов’язані дотримуватися правил безпеки при використанні відкритого вогню, негайно повідомляти керівництво або відповідального диспетчера про будь-які випадки виникнення загорянь чи пожеж. Також вони повинні своєчасно вживати заходів для їх ліквідації, захисту людей і майна.

Працівники, яких приймають на роботу з підвищеним рівнем пожежної небезпеки, зобов’язані пройти спеціальне навчання (курс пожежно-технічного мінімуму) та отримати відповідне посвідчення.

Використані обтиральні матеріали необхідно зберігати в металевих ящиках із щільно закритими кришками. Згідно з встановленим порядком, ці матеріали мають бути вилучені з виробничих приміщень після закінчення зміни та переміщені до спеціально відведених для цього місць.

Куріння на території підприємства дозволяється лише у чітко визначених місцях, які позначені спеціальними табличками чи знаками.

На території підприємства та його об’єктах категорично заборонено: блокувати або захаращувати дороги, під’їзди до будівель, проїзди, водопроводи та пожежні гідранти; відключати окремі ділянки водопровідної системи, внутрішні пожежні крани чи знижувати тиск у водомережах; використовувати воду з пожежних резервуарів чи гідрантів у непередбачених цілях, так само як і первинні засоби пожежогасіння не за призначенням; використовувати горища, підвали чи технічні поверхи для зберігання будь-яких матеріалів; розводити багаття або спалювати сміття, папір, стружку, траву чи інші легкозаймисті матеріали у невстановлених місцях.

4.4 Заходи з електробезпеки

Ці заходи з охорони праці встановлюються для використання таких побутових електроприладів, як електричний чайник, електроплита, мікрохвильова піч, холодильник, кондиціонер, масляний обігрівач, водонагрівач та інша електротехніка.

Дозволено використовувати лише побутові електроприлади заводського виробництва, які мають технічний паспорт, сертифікат відповідності та пройшли перевірку опору ізоляції у встановленому порядку.

Усі нагрівальні прилади повинні встановлюватися на підставки, виготовлені з негорючих і теплоізоляційних матеріалів. Точки підключення електроприладів мають бути обладнані справними розетками євростандарту, що забезпечують заземлення приладу, або підключені безпосередньо до контуру заземлення.

Штепсельна вилка побутового електроприладу повинна бути оснащена третьою клемою для заземлення, яке підключається до справного заземлювального проводу, з'єднаного з контуром. Заземлення приладів слід виконувати відповідно до рекомендацій виробника.

Всі ремонтні роботи або усунення несправностей повинні проводитися тільки після повного відключення електроприладу від живлення і виключно

фахівцями, які мають відповідний дозвіл на ремонт побутової техніки.

Відповідальність за безпечну експлуатацію електроприладів покладається на особу, відповідальну за дотримання протипожежної безпеки у приміщенні, де використовується ця техніка.

Забороняється вносити конструктивні зміни до побутових електроприладів або використовувати деталі, які не передбачені виробником у комплекті поставки.

Перед підключенням будь-якого побутового електроприладу до мережі потрібно перевірити справність шнура, вилки та розетки. Важливо переконатися, що параметри електромережі (напруга у Вольтах, частота в Герцах та сила струму в Амперах) відповідають тим значенням, які вказані на маркуванні приладу. Не допускається використання кабелів із пошкодженнями чи порушеннями контактів у вилці.

Електроприлад перед використанням слід перевірити на відсутність видимих пошкоджень. Напруга мережі має становити ~220 В і бути позначена як на приладі, так і на табличці розетки, яка повинна бути міцно закріпленою. Крім того, електрошнури не повинні мати перегинів чи механічних пошкоджень.

4.5 Заходи безпеки в аварійних ситуаціях

У разі виникнення аварійної ситуації або аварії (зокрема, витоку газів), необхідно діяти наступним чином: залишити небезпечну зону (зону газової хвилі), негайно повідомити про ситуацію керівника чи відповідальну особу, а також розпочати дії з локалізації та ліквідації аварії відповідно до плану ліквідації аварійних ситуацій і аварій (ПЛАС). Якщо участь у заходах ПЛАС неможлива, потрібно терміново евакуюватися в безпечну зону.

У випадку пожежі або задимлення слід негайно сповістити диспетчера підприємства, відзначивши точну інформацію: назву об’єкта, номер цеху, кількість поверхів будівлі, місце виникнення пожежі, поточну ситуацію на місці,

присутність людей, а також повідомити своє прізвище. Окрім цього, необхідно інформувати про подію керівника або відповідальну особу. Якщо є можливість, слід вжити заходів щодо евакуації людей, збереження матеріальних цінностей та ліквідації (локалізації) осередку пожежі за допомогою наявних засобів пожежогасіння. У разі, якщо масштаби аварії продовжують зростати, діяти за планом ПЛАС. Якщо участь у ліквідації неможлива, необхідно залишити небезпечну зону. У випадку займання одягу на людині слід негайно загасити полум'я, обливши його водою або накривши щільною тканиною, після чого за потреби надати першу допомогу при опіках.

На робочих місцях і поруч із телефонними апаратами обов'язково повинні бути розміщені номери телефонів екстрених служб, перелік яких наведено нижче.

4.6 Висновки

Зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу досягається завдяки використанню ефективнішого технологічного обладнання, сучасних систем пилу- та газоочищення, покращенню герметизації виробничих процесів, підвищенню рівня технологічної дисципліни й виробничої культури, а також впровадженню інноваційних технологічних процесів. Вибір методів очищення та відповідного обладнання залежить від складу, властивостей, дисперсності і концентрації забруднюючих речовин, а також потрібного рівня очищення.

Умови праці на підприємствах, що займаються виготовленням вогнетривів, незважаючи на технічні заходи, запроваджені у галузі в 70–80-х роках минулого століття, досі не відповідають сучасним гігієнічним стандартам. Основним шкідливим фактором на таких підприємствах залишається пил, концентрація якого в повітрі робочих зон перевищує допустимі межі у 1,5–10 разів, що впливає на професійну захворюваність працівників.

Одним із напрямів розвитку вогнетривкого виробництва є повернення до співпраці між виробниками продукції з використанням вогнетривкого брухту

та її споживачами. Вони мають ініціювати проведення аналізу властивостей окремих типів вогнетривних матеріалів і досліджень щодо впливу відходів на фізико-хімічні характеристики та хімічний склад вогнетривів для оптимального використання їх у конкретних умовах експлуатації.

ВИСНОВКИ

1. Режим високотемпературної експлуатації ковшів включає наступне: сушіння та нагрівання нового футерування до температури 860–930 °С на експериментальних стендах; використання знімної футерованої кришки на ковшах у процесі очікування випуску плавки з конвертера, розливу металу й заміни шиберного пристрою; застосування високостійких корундових підгніздових і гніздових цеглин; забезпечення швидкої оборотності ковшів із підтриманням температури футерування не нижче 800 °С на всіх етапах переміщення ковша.

2. Під час високотемпературної експлуатації ковшів було зафіксовано суттєве зменшення заростання основного футерування та зниження засмічення каналу сталерозливної склянки. Зношування основного футерування ковшів скоротилося, тоді як рівень зносу кислого залишився незмінним. Як результат, середня стійкість основного футерування ковшів становила 26 наливів.

3. У дослідно-промислових плавках низьколегованої сталі здійснено вимірювання температури струменя металу за допомогою оптичного пірометра на початку й наприкінці розливу плавки із ковшів, накритих футерованою переносною кришкою. Перед випуском плавок із конвертера температура футерування ковшів перебувала в межах 860–1050 °С. Виявлено, що за час розливу сталі температура металу знижувалася лише на 10–15 °С у порівнянні зі стандартною практикою, де вона знижується на 25–30 °С. Така стабілізація температури сприяла покращенню процесу розливу сталі. Завдяки зменшенню температурних коливань від плавки до плавки, а також у процесі розливу сталі за новою технологією, відзначено скорочення утворення тріщин у злитках спокійної сталі, а також підвищення стабільності закупорювання поверхні злитків окалином. Загалом покращена якість спокійної сталі сприяла зниженню рівня сортового браку після термічної зачистки на 1–2%, незалежно від типу футерування (основного чи кислого).

4. Підсумовуючи, високотемпературна експлуатація футерування сталерозливних ковшів (за підтримання температури робочого шару вогнетривів не

нижче 800 °C протягом усього циклу обороту) істотно зменшує теплові втрати сталі під час випуску та розливу, забезпечує високу стійкість основних вогнетривких матеріалів, а також сприяє ефективнішому ресурсозбереженню в сталеплавильному виробництві.

5. На основі результатів дослідно-промислових випробувань, проведених на декількох металургійних підприємствах із врахуванням міжнародного досвіду, була розроблена раціональна технологія високотемпературної експлуатації сталерозливних ковшів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Модернізація промислових печей / О. М. Пеккер, О. М. Мінаєв, В. І. Губінський, О. О. Руденко; За редакцією доктора технічних наук О.М. Мінаєва. Київ : Техніка, 1987. 184 с.

2. Пилипчатин Л. Д., Петренко Л. С., Гірін О. Б. Досвід експлуатації наливних монолітних футеровок сталерозливних ковшів. *Металургія та коксохімія*. Київ : Техніка, 1982. Вип. 77. С. 123-125.

3. Прискорене сушіння наливної монолітної кремнеземистої футеровки сталерозливних ковшів під навісним склепінням / О. В. Танцерєв, Ю. В. Загудайлов, М. В. Крилова та ін. *Вогнетриви*. 1986. № 10. С. 40-43.

4. Дослідження режиму сушіння монолітної футеровки 300-тонного сталерозливного ковша / Н. І. Іванов, В. Н. Антонов, Г. А. Воронов та ін. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 1983. № 1. С.31-33.

5. Високотемпературне нагрівання футерування сталерозливних ковшів / В.А. Зінченко, А. Є. Єрінов, В. Я. Конюх, А. П. Гліке. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 1994. № 4. С. 60-63.

6. Сушіння монолітних футеровок сталерозливних ковшів / П. П. Луцик, Б. П. Дроменко, І. П. Цибін та ін. *Вогнетриви.* 1985. № 4. С. 48-52.

7. Удосконалення обладнання та технології сушіння та розігріву футерування сталерозливних ковшів / В. Н. Чорновіл, Т. С. Леонтьєва, В.В. Конюхов та ін. *Металург.* 1995. № 1. С. 29-30.

8. Сушіння ковшів з монолітними футеровками / В. А. Самсонов, А. А. Шараєв, А. В. Марченко, В. Н. Антонов. *Вогнетриви.* 1984. № 2. С.44-47.

9. Набивні футеровки 160-т сталерозливних ковшів / А. К. Каркліт, Ю.Д. Кузнєцов, Б. А. Великий та ін. *Вогнетриви.* 1975. № 6. С. 4-8.

10. Освоєння технології виготовлення монолітного футерування 150-т сталерозливних ковшів на заводі «Криворіжсталь» / Ю. А. Пирогов, М. І. Прокопенко, О. В. Філонов та ін. *Вогнетриви.* 1982. №9. С. 33-35.

11. Застосування набивних футеровок 250-тонних сталерозливних ковшів / П. І. Маджар, П. К. Лебідь, В. Г. Жеребцов та ін. *Металургійна ігорноруд-на промисловість.* 1981. № 3. С. 39-41.

12. Комбінована основна футеровка сталерозливних ковшів АКОС / Л. М. Демиденко, І. В. Кулеков, І. М. Чорноусов та ін. *Вогнетриви.* 1991. №11. С. 34-36.

13. Сушіння монолітної футеровки 300-т сталерозливних ковшів / Ж. Н. Демідова, Б. А. Великін, В. А. Єрастов та ін. *Вогнетриви.* 1977. № 3. С. 31-34.

14. Лисиця В. К. Вплив геометричних параметрів сопла пальника на величину критичного числа Рейнольдса у смолоскипі. *Металургія: Збірник наук. тр*. Запоріжжя : ЗДІА, 1998. Вип. 1. С. 126-129.

15. Лисиця В. К. Вплив режиму течії в трубі на режим закінчення газового струменя та закономірності його масообміну з середовищем. *Металургія: Зб. наук. тр*. Запоріжжя : ЗДІА, 1998. Вип. 1. С. 129-132.

16. Лисиця В. К. Нові аспекти теорії газового струменя та смолоскипу. *Металургійна теплотехніка. Зб. наук. тр. НМетАУ*. У 2-х томах. Т 2. Дніпропетровськ. 1999. С. 266-270.

17. Лисиця В. К. Рівняння довжини вільного турбулентного факела повним зовнішнім сумішоутворення при безвідривному горінні. *Металургія: Збірник наук. тр.* Запоріжжя : ЗДІА, 2001. Вип. 5. С. 117-118.

18. Лисиця В. К. Методика виміру довжини газового факела. *Металургія: Зб. наук. тр*. Запоріжжя : ЗДІА, 2001. Вип. 5. С. 140-142.

19. Лисиця В. К. Пальник для сушіння та розігріву футеровки сталерозливних ковшів. *Металургійна та гірничорудна промисловість.* 2002. № 7. С. 240-243.

20. O'Driscoll, Mike. Magnesia Supply to the Refractories Industry / Mike O'Driscoll // IMFORMED. - September 2017. - Mode of acess: http:// imformed.com/get-imformed /presentations/.

21. O'Driscoll, M. Refractorymagnesia supply update / M. O'Driscoll // IMFORMED. - March 2018. - Mode of acess:http://imformed.com/get-

imformed/presentations/.

22. O'Driscoll, Mike. The New World of China's refractorymineral supply / Mike O'Driscoll // IMFORMED. - September 2018. - Mode of acess :http://imformed.com/get-imformed/presentations/.

23. Єфремов А. Н., Кривенко П. В. Вогнетривкі бетони на основі лужних в'яжучих з підвищеними термомеханічними властивостями. Макіївка : ДонНАБА, 2008. 187 с.

24. Єфремов А. Н., Ширинова Є. Т. Лужні в'яжучі периклазового та шпінельного складів для вогнетривких бетонів на основі розчинних силікатів та алюмінію натрію. *Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури*. 2007. Вип. 6 (68). С. 80-87.

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

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

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

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

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

30. ДСТУ ГОСТ 12.4.221:2004 Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная для защиты от повышенных температур теплового излучения, конвективной теплоты. Общие технические требования (ГОСТ 12.4.221-2002, IDT).

31. НПАОП 40.1-1.01-97 Правила безопасной эксплуатации электроустановок (ДНАОП 1.1.10-1.01-97).

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

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

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