МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота / проєкт

перший (бакалаврський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему *Мікролегування сталі ванадієм шляхом використання вторинних матеріалів*

Виконав: студент *4* курсу, групи 6.1361-м
спеціальності *136* «*Металургія*»
(код і назва спеціальності)
освітньої програми
Металургія
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації
(код і назва спеціалізації)
Є.С. Степанчак
(ініціали та прізвище)

Керівник *професор кафедри металургійних технологій, екології та техногенноїбезпеки, д. т. н., проф. Скачков В.О.*
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент *доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, к.т.н., доцент Нестеренко Т.М.*
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*
Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський) рівень*
(перший (бакалаврський) рівень, другий (магістерський) рівень)
Спеціальність *136 «Металургія»*
(шифр і назва)
Спеціалізація _____
(шифр і назва)
Освітня програма *Металургія*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри*МТЕТБ*
Юрій БЄЛОКОНЬ
« 27 » 12 2024 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Степанчак Євгену Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи (проєкту) *Мікролегування сталі ванадієм шляхом використання вторинних матеріалів*
керівник роботи *д-р.техн.наук, професор Скачков Віктор Олексійович*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "*27*" *грудня 2024 року № 2031-с*
2. Строк подання студентом роботи *11.06.2025 р.*
3. Вихідні дані до роботи *Науково-технічна література, статті у фахових виданнях, матеріали конференцій, патенти та ДСТУ.*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Реферат. Вступ. Основи процесу мікролегування сталі. Вибір матеріалу та обгрунтування методики дослідження. Термодинамічні основи відновлення ванадію з пентоксиду ванадію та розрахунок складу легуючих сумішей. Дослідне випробування сумішей для легування сталі ванадієм і азотом.Охорона праці та техногенна безпека. Загальні висновки. Перелік джерел посилання.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Титульний лист – 1. Мета роботи. Завдання роботи – 1. Хімічний склад ванадієвого шлаку. Хімічний і гранулометричний склад металізованих окатишів – 1. Варіанти приготування комплексних сумішей – 1. Склад сумішей для введення в сталь ванадію і ванадію спільно з азотом – 1. Загальний вигляд та технічна характеристика розривної машини МР-0,5-1 – 1. Результати випробувань виготовлених партій брикетів на міцність. Результати випробувань виготовлених партій

брикетів на міцність – 1. Параметри технології виробництва окатишів. Гранулометричний склад окатиш – 1. Залежність механічної міцності окатишів від тривалості зберігання – 1. Загальні висновки – 2.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основи процесу мікролегування сталі	*професор Скачков В.О.*		
Вибір матеріалу та обгрунтування методики дослідження	*професор Скачков В.О.*		
Термодинамічні основи відновлення ванадію з пентоксиду ванадію та розрахунок складу легуючих сумішей	*професор Скачков В.О.*		
Дослідне випробування сумішей для легування сталі ванадієм і азотом	*професор Скачков В.О.*		
Охорона праці та техногенна безпека	*професор Скачков В.О.*		
Нормоконтроль	*доцент О.С. Воденнікова*		

7. Дата видачі завдання *27.12.2024 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Реферат. Вступ*	*17.02.2025-20.02.2025*	
2	*Основи процесу мікролегування сталі*	*21. 02.2025-17.03.2025*	
3	*Вибір матеріалу та обгрунтування методики дослідження*	*18. 03.2025-31.03.2025*	
4	*Термодинамічні основи відновлення ванадію з пентоксиду ванадію та розрахунок складу легуючих сумішей*	*01.04.2025-05.05.2025*	
5	*Дослідне випробування сумішей для легування сталі ванадієм і азотом*	*06.05.2025-27.05.2025*	
6	*Охорона праці та техногенна безпека*	*28.05.2025-07.06.2025*	
7	*Загальні висновки. Перелік джерел посилання. Графічна частина*	*08.06.2025-10.06.2025*	

Студент _____ *Євген СТЕПАНЧАК*
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____ *Віктор СКАЧКОВ*
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено
Нормоконтролер _____ Оксана ВОДЕННІКОВА
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 69 с., 15 рис., 21 табл., 20 джерел посилання.

МІКРОЛЕГУВАННЯ СТАЛІ, ВАНАДІЙ, ВАНАДІЄВИЙ ШЛАК, ОКОМКУВАННЯ, БРИКЕТУВАННЯ.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: Мікролегування сталі ванадієм шляхом використання вторинних матеріалів.

Мета роботи – дослідження технології мікролегування сталі ванадієм шляхом застосування вторинних матеріалів.

У розділі 1 розглянуто сьогоденні способи легування сталі ванадієм та визначено раціональний спосіб легування сталі ванадієм.

У розділі 2 описано матеріали і методи дослідження технології мікролегування сталі ванадієм шляхом застосування вторинних матеріалів.

У розділі 3 приведено термодинамічні основи відновлення ванадію з пентоксиду ванадію та розрахунок складу легуючих сумішей.

У розділі 4 показано результати дослідного випробування сумішей для легування сталі ванадієм і азотом.

У розділі 5 приведено основи охорони праці та техногенної безпеки в процесі брикетування та окомкування сумішей для легування сталі ванадієм і азотом.

Результати роботи можуть бути використані при викладанні спеціальних дисциплін для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 136 «Металургія».

ЗМІСТ

ВСТУП……7
1 ОСНОВИ ПРОЦЕСУ МІКРОЛЕГУВАННЯ СТАЛІ…….....9
1.1 Загальні особливості мікролегування сталі……9
1.2 Механізм карбонітридного зміцнення……..11
1.2.1 Дисперсійне зміцнення……...13
1.2.2 Зміна аустенітного і дійсного зерна сталі……12
1.2.3 Утворення субзеренної структури……..…12
1.3 Основи легування сталі ванадієм……..13
1.3.1 Легування сплавами, що містять ванадій……..15
1.3.2 Утилізація ванадію, що міститься у відходах ванадійвмісних сталей і чавунів……...…….16
1.3.3 Легування ванадієм з використанням оксидів ванадію……...16
1.4 Ванадієві легуючі матеріали……..…17
1.4.1 Легуючі сплави……17
1.4.2 Матеріали для прямого легування……..…..19
1.4.3 Ванадийсодержащие шихтові матеріали……....23
1.5 Способи введення азоту в сталь…….……23
1.6 Вибір оптимального способу легування сталі ванадієм…….24
1.7 Мікроструктура сталі, легованої ванадієм, молібденом та бором…….....26
1.8 Висновки……..…28
2 ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ…….29
2.1 Вибір відновника……29
2.2 Методика дослідження сумішей для легування сталі ванадієм і азотом…30
2.3 Висновки……32
3 ТЕРМОДИНАМІЧНІ ОСНОВИ ВІДНОВЛЕННЯ ВАНАДІЮ З ПЕНТОКСИДУ ВАНАДІЮ ТА РОЗРАХУНОК СКЛАДУ ЛЕГУЮЧИХ СУМІШЕЙ……..…….35

3.1 Термодинамічні основи відновлення ванадію з пентоксиду ванадію……35
3.1.1 Відновлення вуглецем……..35
3.1.2 Відновлення кальцієм і алюмінієм……37
3.1.3 Відновлення кремнієм……39
3.2 Розрахунок відновника……..40
3.2.1 Розрахунок відновника за першим варіантом……..44
3.2.2 Розрахунок відновника за другим варіантом……...47
3.2.3 Розрахунок відновника за третім варіантом……48
3.2.4 Розрахунок відновника за четвертим варіантом……..49
3.3 Розрахунок складу сумішей……...51
3.4 Висновки……52
4 ДОСЛІДНЕ ВИПРОБУВАННЯ СУМІШЕЙ ДЛЯ ЛЕГУВАННЯ СТАЛІ ВАНАДІЄМ І АЗОТОМ……...53
4.1 Обробка експериментальних даних брикетування та окомкування сумішей для легування сталі ванадієм і азотом……53
4.2 Дослідне випробування брикетів і окатишів для легування сталі…….....58
4.3 Висновки……59
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА……..60
5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів в лабораторії……60
5.2 Заходи щодо захисту від шкідливих і небезпечних чинників лабораторії……..60
5.3 Порядок проведення контролю параметрів мікроклімату……62
5.4 Правила техногенної безпеки в лабораторії……...63
5.5 Висновки……65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ……...67

ВСТУП

На сьогодні немає деталей чи конструкцій, які не потребують покращення якості та не відчувають циклічного завантаження. Періодично активні навантаження можуть бути представлені за рахунок високого та низького тиску, термоциклічних, оперативних навантажень різних частот та асиметрії циклу навантаження. Тому оптимальна структура та фазовий склад променів повинні бути утворені в литому стані. Важливість закономірностей формування складної структури та створення активної технології дозволяє передбачити мікроструктуру сплаву та остаточних властивостей.

Відомо, що якість рідкої сталі та відповідно виготовлених з неї виробів залежить не тільки від якості шихтових матеріалів (металевий лом, чавун, залізняк) або дотримання технологічного регламенту того або іншого металургійного переділу, але і від якості феросплавів, використовуваних при розкислюванні, легуванні або модифікації сталі.

Перспективною технологією, що забезпечує зниження енерго- і матеріаломісткості виробництва, а також мінімальне забруднення навколишнього середовища, є технологія прямого легування сталі з оксидних матеріалів (руди, концентратів, шлаків та інших відходів виробництва, що містять легуючі елементи).

Процес легування в сталеплавильному агрегаті або в сталерозливному ковші організовують так, щоб забезпечити синхронізацію плавлення початкових компонентів реакції і самого процесу відновлення. Така синхронізація досягається строгими технологічними прийомами з використанням початкових матеріалів заданої фракції.

Технологія прямого легування практично не супроводжується утворенням безповоротних втрат, а ступінь витягання елементу з оксиду складає 80– 95%, при цьому втрати відновника не перевищують 5%.

На сьогодні серед проблем легування сталі, питання мікролегування займає особливе місце. Не дивлячись на широке застосування в практиці

процесу мікролегування, немає єдиного загальноприйнятого визначення цього терміну. Це пов'язано з тим, що мікролегування часто супроводжується модифікуючою і рафінуючою дією на сталь, і іноді не можна розділити ефекти мікролегування і модифікації. Більш того, для мікролегування, рафінування і модифікації часто використовуються одні і ті ж речовини в одних і тих же кількостях. Під мікролегуванням пропонується розуміти “спеціальне введення в сплав окремих елементів або їх з'єднань, залишковий вміст яких, не перевищує 0,1%, значно підвищує механічні або інші службові властивості матеріалу”. Але це визначення підходить і до модифікації. При мікролегуванні введений елемент може входити до складу матриці, змінюючи її характеристики. Проте при цьому не виключається можливість утворення з'єднань з іншими елементами, що знаходяться в твердому розчині. Якщо виявляються зв'язаними шкідливі домішки і очищаються міждендритні ділянки або межі зерен, що ефект мікролегування поєднується з тим ефектом рафінування. Таким чином, при введенні малих добавок можна говорити про їх комплексну дію на сталь. Мікролегування є могутнім чинником, який впливає на чистоту сталі, зміну умов кристалізації, будову прикордонних зон і об'єму зерна, отримання однорідної структури і так далі [1– 4].

1 ОСНОВИ ПРОЦЕСУ МІКРОЛЕГУВАННЯ СТАЛІ

1.1 Загальні особливості мікролегування сталі

У чорній металургії для легування сталі в малих кількостях застосовують тугоплавкі метали (Zr, Ti, Nb, V), рідкоземельні метали (Ce, La, Y) і їх суміші (фероцерій, миш-метал), а також Al, Ca, Mg, B, Ba, N. По впливу елементів на сталь їх можна приблизно розділити на три групи (рис.1.1).

Розділення даних елементів на три групи по функціональній дії пов'язане з відмінністю спорідненості елементів до кисню, ступінь якого убуває в послідовності (Ba, Ca,Mg) → (Al, Ti, Zr) → (V, Nb).



Рисунок 1.1 – Можливості впливу елементів на сталь.

За останні роки був накопичений певний практичний і теоретичний досвід в питаннях мікролегування. Відомі результати досліджень по вивченню впливу рідкісних і рідкоземельних елементів на фізико-механічні властивості конструкційних сталей різного ступеня легування, а також сталей мартенситного і аустенітного класів. Показана можливість мікролегування

сталі представляє інтерес з економічної і технічної точок зору. Значне підвищення властивостей таких сталей досягається шляхом введення малої кількості легуючих добавок: молібдену (0,2-0,3%), титану і ванадію (0,1%), міді (0,5-0,7%), цирконію (0,1%). Ще краще поєднання механічних і технологічних властивостей досягається у разі додаткового комплексного легування молібденом, титаном і нікелем або ванадієм, титаном і нікелем. Рідкоземельні метали при введенні в сталь в кількості 0,1– 0,15% покращують макроструктуру злитка, ослабляють зональну ліквацію сірки, стабілізують пластичні властивості сталі та ударну в'язкість (40, 40Х, 40ХН, 45Г2) і зменшують забрудненість деяких сталей (40Х, 45Г2) неметалічними включеннями.

Відомі процеси розкислювання, модифікації і мікролегування рейкової сталі, пов'язані з дією мікродобавок хімічно активних елементів. Дія цих елементів на сталь показана в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Характер дії елементів на рейкову сталь

Дія	Ba	Ca	Mg	Al	Ti	Zr	V	Nb
Розкислення	+	+	+	+	+	+	–	–
Модифікація	+	+	+	+	+	+	–	–
Мікролегування	–	–	–	+	+	+	+	+

Встановлено, що найбільш ефективне мікролегування рейкової сталі елементами, які підвищують дисперсність структури і одночасно утворюють дисперсні карбонітридні фази, що виділяються і розчиняються при температурах плющення та термічної обробки. З випробуваних в даній роботі елементів до них відноситься ванадій. Найбільш ефективне підвищення рівня якості і експлуатаційної стійкості рейок забезпечується при одночасній реалізації процесів модифікації і мікролегування.

Одним з елементів, що викликають інтерес у якості мікролегуючої добавки для введення в сталь, є ванадій. Останнім часом сталі, леговані ванадієм набувають все більшого поширення. До них відносяться

конструкційні низьколеговані сталі (14Г2АФ, 16Г2АФ), рейкові сталі (М76В), сталі для литва (08ХГФЛ, 20Г1ФЛ, 15ФАЛ).

1.2 Механізм карбонітридного зміцнення

Найбільш ефективним способом комплексного підвищення механічних характеристик вище перелічених марок сталі є карбонітридне зміцнення шляхом скріплення азоту (залишкового або такого, що спеціально вводиться) такими елементами як титан, ванадій, ніобій. При цьому в сталі утворюються карбіди, нітриди, карбонітриди. Даний механізм зміцнення сталі отримав назву карбонітридного і є ефективнішим, ніж звичайне підвищення вмісту вуглецю, оскільки при цьому знижується пластичність сталі і зростає чутливість до концентраторів напруги.

З карбідоутворювальних елементів ванадій утворює карбонітриди, розміри яких найлегше регулювати в процесі термічної обробки. Карбонітриди ванадію в сталі обумовлюють її дисперсійне зміцнення, подрібнення зерна аустеніту і дійсного зерна сталі.

Зернограничне і дисперсійне зміцнення сталі вносять основний внесок до зростання межі текучості ванадійвмісних сталей. Після оптимальної обробки сталей з ванадієм спостерігається їх сильне зміцнення із збереженням при цьому холодостійкості за рахунок компенсуючого впливу подрібнення зерна на дію до охрупчення інших чинників. Чинники карбонітридного зміцнення розглянуті докладніше нижче.

1.2.1 Дисперсійне зміцнення

У сталях, вживаних без термічної обробки або після нормалізації, карбонітридні частинки утворюються в процесі охолоджування на різних стадіях розпаду аустеніту. У сталях, що піддаються гарту з подальшою високою відпусткою, утворення карбонітридів відбувається в процесі відпустки.

Карбонітрідні частинки, рівномірно виділяючись в тілі зерна, гальмують рух дислокацій, що ініціюється зовні прикладеними навантаженнями. При однаковій об'ємній частці частинок, що виділилися, відстань між ними тим менше, чим вище їх дисперсність. Із зменшенням міжчасткової відстані зростає межа текучості сталі. Внесок карбонітридних частинок в зміцнення може бути оцінений кількісно, і його частка в загальному зміцненні складає ~15-25% .

1.2.2 Зміна аустенітного і дійсного зерна сталі

Як відомо, при нагріві ферито-перлітної сталі вище за критичні крапки (для нормалізації або гарту) відбувається $\alpha \to \gamma$ перетворення. Підвищення температури в аустенітної області приводить до зростання аустенітного зерна за рахунок збірної рекристалізації. Карбонітрідні фази є ефектними “бар’єрами”, гальмуючими зростання зерен аустеніту при його нагріві, аж до температур розчинення цих фаз в аустеніті. Внаслідок цього сталі з карбонітридами мають аустенітне зерно значно дрібніше, ніж звичайні сталі. Дрібніше аустенітне зерно приводить до отримання дійсного зерна істотно меншого розміру. Частка зернограничного зміцнення в загальному зміцненні ванадійвмісних сталей складає ~30-40%, а пониження температури переходу їх з в'язкого стану в крихке цілком визначається дрібнозернистістю. Найбільш ефективна дія карбонітридів на властивості сталі досягається при такому вмісті зміцнюючої фази і температурі аустенізації, при яких в розчин переходить достатня для подальшого дисперсійного зміцнення кількість зміцнюючої фази, а нерозчиненою залишається кількість фази, необхідна для створення ефективних “бар'єрів”, гальмуючих зростання зерен.

1.2.3 Утворення субзеренної структури

При відпустці сталі з карбонітридною фазою утворюється досконала субзеренна структура. Дисперсні карбонітріди, роблячи вплив на перерозподіл

дислокацій, обумовлюють утворення усередині зерен полігональних меж дислокацій з малими кутами разорієнтування. Добре розвинена субструктура вносить певний внесок до зміцнення, оскільки субмежі є перешкодами на шляху рухомих в процесі пластичної деформації дислокацій. Зміцнююча роль субструктури визначатиметься в першу чергу щільністю субмеж. Чим менше розмір блоків, тим більше щільність субмеж, тим вище опір деформації. Карбонітрідні фази можуть робити вплив і на механічні властивості сталі за рахунок зміни стійкості аустеніту, що переохолоджував (а для гартованих сталей – їх прожарюваності).

1.3 Основи легування сталі ванадієм

Не дивлячись на те, що ванадій досить поширений елемент, технологія його отримання досить складна із-за малого вмісту в рудах і наявності побічних компонентів.

Ванадій має невелику розкислювальну здатність, близьку до значень марганцю, і може розчинятися в сталі при досить високих концентраціях кисню. З підвищенням температури розкислювальна здатність ванадію знижується.

З аналізу літературних, експериментальних і розрахункових даних виходить, що в системі ванадій кисень при температурах сталеплавильних процесів стійкі оксиди VO, V_2O_3, VO_2, V_2O_5, при цьому в розплавлених сталеплавильних шлаках, що контактують із залізом з невисокою концентрацією ванадію (до 0,3%), ванадій знаходиться переважно у вигляді іонів V^{3+}.

В цьому випадку між металом і шлаком протікатиме реакція:

$$\frac{1}{2}(V_2O_5)+\frac{3}{2}[Fe]=\frac{3}{2}(FeO)+V. \qquad (1.1)$$

Вивчення в лабораторних умовах рівноважного розподілу ванадію між

сталлю, що містить 0,4-0,5% C, 0,4-0,9% Mn, 0,2-0,5% Si, 0,02-0,2% V і шлаком системи $Ca-MgO-MnO-SiO_2-FeO$, близьким за хімічним складом до кислих, нейтральних і основних електросталеплавильних шлаків, і розрахунок за відомими термодинамічними даними і формулами дозволили встановити, що коефіцієнт активності окислу ванадію в шлаку слабо залежить від складу шлаку і зменшується з підвищенням температури ($\gamma_{V_2O_5}$=2,8 при 1600 ^{0}C та $\gamma_{V_2O_5}$=2,6 при 1750 ^{0}C) [5].

Використовуючи дані про активність компонентів металу і шлаку, можна визначити вплив окисленості і основності шлаку на розподіл ванадію між шлаком і металом. Розподіл ванадію характеризується відношенням $(V)^{1/2}/[V]$ (показник розподілу) і визначається з рівняння:

$$\frac{(V)^{1/2}}{[V]} = A\frac{\alpha_{FeO}^{2/3}\gamma_V}{K_p^{1/2}\gamma_{V_2O_5}^{1/2}}. \qquad (1.2)$$

де (V) і [V] – вміст ванадію в шлаку і металі, % по масі;

А – коефіцієнт, що враховує перехід від молярних доль до масових відсотків;

α_i, γ_i – активності і коефіцієнти активності;

Кр – константа рівноваги реакції (1.1).

Для основного сталеплавильного процесу низької величини $(V)^{1/2}/[V]$ можна досягти лише при невеликому вмісті оксидів заліза в шлаку. У кислому процесі сприятливий розподіл ванадію можливий при вищих концентраціях оксидів заліза в шлаку; із зростанням температури цей показник знижується.

Термодинамічна оцінка впливу концентрації C, Si, Mn, V, що містяться в сталі, на показник розподілу при низькій активності оксидів залоза в шлаку, підтверджена експериментальними даними, показала, що Mn, Si, і V при їх звичайному вмісті в сталі майже не впливають на показник розподілу.

Таким чином, розподіл ванадію між металом і шлаком і, отже, ступінь

засвоєння ванадію сталлю визначається в першу чергу активністю закису заліза в шлаку (тобто концентрацією оксидів заліза в шлаку, його хімічним складом і температурою).

Отримані в роботі [5] кількісні закономірності характеризують розподіл ванадію між металом і шлаком при виплавці низьколегованих сталей. При плавці чавунів і високолегованих сталей вуглець, кремній та інші легуючі елементи з їх високою концентрацією вносять істотні поправки до цих закономірностей. Проте загальні висновки про переважний вплив на розподіл ванадію між металом і шлаком, окисленість шлаку, температури, а також хімічного складу шлаку і активності ванадію в металі повністю зберігаються. Встановлення закономірності поведінки ванадію при сталеплавильному процесі дозволяє визначити можливі основні технологічні методи отримання ванадієвих сталей і чавунів.

1.3.1 Легування сплавами, що містять ванадій

Класичним прикладом цього методу є застосування феровanадію. Проте феровanадій дорогий і дефіцитний, оскільки його отримання засноване на багатоступінчатій хіміко-металургійній переробці титаномагнетитових руд. На кожному з металургійних переділів неминучі потри ванадію, в результаті крізне витягання цього елементу складає 39,5%, а у ряді випадків і значно нижче.

Останнім часом проводять різні ванадійвмісні сплави (лігатури), до складу яких, окрім ванадію входять і інші розкислюючі та легуючі елементи: кремній, марганець, хром, титан, азот та ін. Легування такими сплавами володіє багатьма перевагами: легко здійснюється, практично не впливає на технологічний процес виплавки сталі. Проте легуючі сплави дорогі і дефіцитні, що різко обмежує їх застосування для легування.

1.3.2 Утилізація ванадію, що міститься у відходах ванадійвмісних сталей і чавунів

Плавка сталі ведеться методом переплаву з окисленням або без окислення вуглецю. Шлак, який утворюється в процесі плавки, щоб уникнути втрат ванадію не віддаляється. Цей спосіб економічний, але володіє значними недоліками. Неможливість проведення окислювальної дефосфорації викликає необхідність застосування високоякісної шихти з низьким змістом фосфору. Зміна вмісту ванадію в шихті в широких межах вимагає оперативного контролю концентрації ванадію в металі в процесі плавки. Цей спосіб особливо ефективний на заводах, де всі сталі або чавуни виплавляються з ванадієм, що полегшує використання в шихті ливарних відходів при виплавці сталей і чавунів в електропечах і кислих мартенівських печах, а також чавунів у вагранках.

1.3.3 Легування ванадієм з використанням оксидів ванадію

Легування ванадієм з використанням оксидів ванадію - найбільш прогресивний спосіб виробництва ванадієвих сталей. Оксиди ванадію при цьому в чистому вигляді або у якості складника складних з'єднань вводиться в плавильний агрегат. Цей спосіб отримав найменування прямого легування сталі. Він дозволяє використовувати для легування сталі недефіцитні і дешеві матеріали.

Доцільність прямого легування сталі ванадію обумовлює наступними чинниками:

– високою вартістю і дефіцитністю феровanадію, що значно обмежує об'єм виробництва високоефективних ванадійвмісних сталей;

– складністю технології переробки ванадієвої сировини на феровanадій та великих втратах ванадію (досягають 70%);

– наявністю ресурсів ванадійвмісних матеріалів, які можуть бути

використані для прямого легування, при цьому вартість ванадію в них значно нижча, ніж в легуючих сплавах.

1.4 Ванадієві легуючі матеріали

Відповідно до перерахованих вище трьох основними методів легування сталі ванадієм вживані з цією метою матеріали можна розділити на три групи:

1) Легуючі сплави – сплави заліза з ванадієм (феровanадій), які можуть додатково містити і інші легуючі елементи (лігатури). Вони повинні володіти невисокою температурою плавлення, мінімальним вмістом шкідливих і небажаних домішок.

2) Матеріали для прямого легування, що містять оксиди ванадію. В основному це проміжні продукти, що отримуються в процесі переробки ванадійвмісних руд на феровanадій (конвертерний шлак, металовідсів, а також металізовані окатиші). Основні вимоги до матеріалів – достатньо високий вміст ванадію, мінімальний зміст баластних оксидів і шкідливих домішок.

3) Ванадійвмісні шихтові матеріали – сталевий лом, скрап, природно-легований ванадієм чавун. Основні вимоги: відсутність іржі, кольорових металів і мінімальний вміст шкідливих домішок.

1.4.1 Легуючі сплави

Феровanадій – основний сплав ванадію із залізом, широко застосовується для легування ванадієм різних сталей. Відрізняється високим вмістом ванадію і низькою концентрацією домішок (таблиця 1.2, 1.3). Феровanадій, що випускається, містить 40-80% ванадію, температура плавлення цього сплаву близько 1450 ^{0}C. Феровanадій виплавляється згідно з ГОСТ 27130-94 (ISO 5451-80). Застосовувати феровanадій рекомендується тільки при виплавці сталей і чавунів із вмістом ванадію більше 0,3% або при виплавці сталі в основних мартенівських печах і конвертерах.

У тих випадках, коли сталь виплавляється в мартенівських печах з основною футеровкою, легування ванадієм доцільніше здійснювати ванадійвмісною лігатурою.

Лігатура вводиться в піч безпосередньо перед випуском або в ківш. Вартість такого легування нижча, ніж легування з використанням стандартного феровanадію.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад феровanадію згідно з ГОСТ 27130-94

Марка (ГОСТ)	Масова частка, %								
	V	Mn	Si	C	Cu	As	Al	P	S
		не більше							
ФВд50У0,4	48-60	2,7	1,8	0,40	0,2	0,01	0,2	0,07	0,02
ФВд50У0,5	48-60	4,0	2,0	0,50	0,2	0,01	0,3	0,07	0,02
ФВд50У0,6	48-60	5,0	2,0	0,60	0,2	0,02	0,3	0,07	0,03
ФВд50У0,3	не менше 50	0,2	20	0,30	0,2	0,05	2,5	0,10	0,10
ФВд50У0,75	не менше 50	0,2	2,0	0,75	0,2	0,05	2,5	0,10	0,10
ФВд40У0,5	35-48	2,0	2,0	0,50	0,4	0,03	0,5	0,08	0,05
ФВд40У0,75	35-48	4,0	2,0	0,75	0,4	0,03	0,5	0,08	0,05
ФВд40У1	35-48	6,0	2,0	1,00	0,4	0,03	0,5	0,10	0,05

Табліца1.3 - Хімічний склад феровanадію згідно з ISO 5451-80

Марка (ISO)	Масова частка, %									
	V	Si	Al	C	S	P	As	Cu	Mn	Ni
		не більше								
FeV40	35-50	2,0	4,0	0,30	0,10	0,10	–	–	–	–
FeV60	50-65	2,0	2,5	0,30	0,05	0,06	0,06	0,10	–	–
FeV80	75-85	2,0	1,5	0,30	0,05	0,06	0,06	0,10	0,50	0,15
FeV80A112	75-85	1,5	2,0	0,20	0,05	0,06	0,06	0,10	0,50	0,15
FeV40A114	70-80	2,0	4,0	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,50	0,15

Технологія виробництва лігатури менш складна, чим феровanадію, що дає можливість: скоротити технологічні втрати ванадію в порівнянні з виробництвом феровanадію; здійснити одночасно з легуванням розкислювання стали, що зменшує витрату розкислювачів і підвищує засвоєння ванадію металом; скоротити витрати на легування сталі.

У промислових масштабах виплавляються головним чином залізокремнійванадієві лігатури згідно ТУ 14-5-100–78 (таблиця 1.4). Температура плавлення лігатур (1350-1400 ^{0}C) нижча, ніж температура плавлення феровanадію, що особливо важливе при легуванні в ковші.

Таблиця 1.4 – Хімічний склад кремнійванадієвих лігатур, %.

Марка лігатури	V	Si	Ti	Cr	C	P	S
	не менше		не більше				
ФВдС1	20	5…20	1,5	2,0	1,0	0,10	0,02
ФВдС2	20	5…20	2,5	3,0	2,0	0,10	0,03
ФВдС3	10	5…20	2,0	2,5	1,0	0,10	0,02
ФВдС4	10	5…20	3,0	3,0	1,5	0,10	0,03
ФВдС5	8	5…20	5,0	6,0	2,0	0,20	0,03
ФВдС6	4	50…60	2,5	3,0	1,0	0,10	0,03
ФВдС7	4	40…50	2,5	3,0	1,0	0,10	0,03
ФВдС8	4	20…40	2,5	3,0	1,0	0,10	0,03

1.4.2 Матеріали для прямого легування

Найбільш широко вживаним матеріалом для прямого легування є ванадієвий конвертерний шлак. Ванадієвий шлак утворюється при окислювальному продуванні ванадієвого чавуну в конвертерах.

Хімічний склад ванадієвого шлаку (у % по масі): 35-40 $Fe_{заг.}$ (у оксидах), 13-25, 4-10 TiO_2, 5-12 MnO, 13-24 V_2O_5, 0,5-1,5 CaO, 2-3 MgO, 2-3 Al_2O_3, до 0,1% P и S. Крім того в шлаку міститься до 20% металовключень. Ванадієвий

шлак гетерогенний. Його фазовий склад визначається в основному чотирма структурними складовими: шпінелідної (46-48%), фаялітної (45-48%), кристобалітної (2-3%) і металевою. Оксиди ванадію майже повністю (92-98 %) входять до складу шпінелідної фази. Шпінеліди тугоплавкі – температура плавлення близько 1800 ^{0}С. Температура почала плавлення шлаку близько 1250 ^{0}С. Постачається ванадієвий шлак згідно з ТУ 14-11-178–79. За хімічним складом шлак в масі сухої речовини повинен відповідати певним вимогам (таблиця 1.5).

Ванадієвий шлак володіє комплексом властивостей, що роблять його найбільш технологічним матеріалом для прямого легування сталі. Це в першу чергу наявність достатніх ресурсів, невисока вартість ванадію, чистота за шкідливими домішками. Хімічний склад ванадієвих шлаків приведений в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Хімічний склад ванадієвого шлаку, %

Марка ванадієвого шлаку	V_2O_5	SiO_2	P	CaO	Металеві включення
	не менше				
ШВд1	16	20	0,07	1,3	15
ШВд2	16	20	0,08	3,0	17
ШВд3	13	26	0,08	1,5	17
ШВд4	13	26	0,12	не регламен-тується	17

При підготовці ванадієвого конвертерного шлаку до хіміко-металургійної переробки проводиться його подрібнення і магнітна сепарація. При цьому відділяється магнітна фракція (металовідсів ванадієвий), що є конгломератом з металевої і шлакової фаз.

Металева фаза містить близько 3% вуглецю, 0,03-0,06% ванадію і сліди марганцю, кремнію, титану; шлакова фаза – звичайний ванадієвий шлак

стандартного складу. Вміст ванадієвого шлаку в металовідсіві складає 15…30%. Хімічний склад метало відсіву, %: у загальній масі не менше 1,0 V, металевої маси не більше 0,1 V, 3,5 C, 0,5 Cr, 0,1Cu, 0,1 Ni і 0,1 P, 0,1 S.

На кафедрі електрометалургії сталі і феросплавів Сибірської державної гірничо-металургійної академії розроблені і випробувані у виробничих умовах брикети на базі ванадієвого конвертерного шлаку і кремнійванадієвої лігатури ФС40Вд6 (згідно з ТУ 14-5-177-87); у якості флюсу використаний доломіт. Брикети, призначені для легування ванадієм якісної сталі в ковші, характеризуються високим ступенем витягання ванадію і низькою витратою алюмінію, пожежабезпеки, транспортабельні, відповідають вимогам екології.

На металургійному комбінаті ім. Коваля для легування стали ванадієм в ковші застосовували брикети у вигляді циліндрів масою 0,5 кг, які отримували методом пресування, при цьому використовували нижньотагільський шлак ШВд-Э1, ванадієву лігатуру, порошкоподібний алюміній марки АПВ-П і частково обпалений доломіт та содове рідке скло у якості пов’язуючого матеріалу.

Зіставлення даних при промисловому випробуванні брикетів свідчить про технологічність розроблених брикетів: тривалість їх згорання не перевищує 2 хв., склад металу в ковші стабільний по висоті, охолоджування сталі в процесі легування не відбувається. При підвищеній (>10кг/т) масі навішування брикетів можливий підігрів металу у верхній частині ковша. Це відбувається за рахунок концентрації тепла екзотермічних реакцій на межі сталь-брикети (брикети спільно з пічним шлаком, що знов утворюється, екранують це тепло). Витягання ванадію тільки з конвертерного шлаку складає 94% при повному засвоєнні ванадію з лігатури

Випробування підтвердили можливість легування ванадієм сталі (≤ 0,15% V, ≤0,37% Si, ≤ 0,12% Ti) брикетами без підвищення по верхній межі вмісту кремнію і титану. Використання лігатури для легування сталі ванадієм спільно з прямим відновленням його з конвертерного шлаку дозволяє підвищити крізне витягання ванадію на 20-25% при зниженні витрат на легування на 25-30%.

Принципово новими і перспективними матеріалами для прямого легування ванадієм сталі і чавуну є ванадійвмісні металізовані окатиші, що отримуються шляхом прямого відновлення концентратів титаномагнетитових ванадійвмісних руд.

Розроблена і пройшла стадію промислового освоєння технологія виробництва і використання металізованих окатишів при виплавці ванадієвих сталей і чавунів. Окатиші є відновленим залізом із ступенем металізації $Fe_{аг.}/Fe_{мет}$=80-90%, що містить оксиди заліза, ванадію, а також шлакоутворюючі оксиди SiO_2, CaO і MgO. Середній склад металізованих окатишів, %: 75-90 $Fe_{заг}$, 10-20 FeO, 60-80 $Fe_{мет}$, 1-4 C, 4-5 SiO_2, 2-8 CaO, 2-5 MgO, 0,6-0,7 V_2O_5, до 0,01 P та S.

Вміст основних оксидів CaO та MgO визначається ступенем офлюсування початкових (окислених) окатишів.

Ванадієві металізовані окатиші, що отримуються на установці прямого відновлення призначені для прямого легування ванадієм стали і чавуну. При цьому вони містять не менше 1% вуглецю і повинні відповідати вимогам приведеним в таблиці 1.6

Слід зазначити такі переваги металізованих окатишів, як низький вміст фосфору, сірки, практична відсутність домішок шкідливих кольорових металів (олово, миш'як, свинець, сурма і т. д.), постійність хімічного складу.

Таблиця 1.6 – Хімічний і гранулометричний склад металізованих окатишів

Вид окатишів	Вміст компонентів, %				Фракції <5 мм, не більше	Ступінь металізації, %
	$Fe_{заг}$	$Fe_{мет}$	FeO	V_2O_5		
	не менше					
Не офлюсовані	80,0	70,0	14,0	0,65	10	80
Офлюсовані	75,0	61,0	20,0	0,65	10	80

Застосування ванадієвих окатишів дозволяє здійснити легування сталі

ванадієм; підвищити якість металу за рахунок застосування шихти з низьким вмістом шкідливих домішок; істотно понизити безповоротні втрати ванадію за рахунок виключення переділу ванадійвмісного концентрату по схемі чавун – ванадієвий шлак – феровanадій.

1.4.3 Ванадійвмісні шихтові матеріали

Високі металургійні якості ванадієвого чавуну (таблиця 1.7, 1.8) і не висока вартість ванадію, що міститься в нім, дозволяють ефективно застосовувати його у якості шихтового і легуючого матеріалу для виплавки сталі, особливо одношлаковим процесом.

Табліца1.7 – Хімічний склад ванадієвого чавуну, %

	C	Si	Mn	V	Ti	Cr	S	P
Группа I	4,3…4,9	0,2…0,5	0,2…0,6	0,4…0,8	0,2…0,4	0,1...0,5	0,04	0,05
Группа II	4,3…4,9	0,2…0,5	0,61…1,0	0,4…0,8	0,2…0,4	0,51…0,9	0,04	0,05
Группа III	4,3…4,9	0,2…0,5	1,01…1,4	0,4…0,8	0,2…0,4	0,91…1,3	0,04	0,05

Таблиця 1.8 – Середній хімічний склад ванадієвого чавуну, %

Виробник	C	Si	Mn	V	Ti	Cr	S	P
ЧУСМЗ	4,6	0,32	0,36	0,484	0,26	0,3	0,029	0,05
НТМК	4,6	0,2	0,31	0,463	0,23	0,3	0,027	0,03

1.5. Способи введення азоту в сталь

На сьогодні для легування азотом сталей застосовуються, головним чином, азотовані в твердому стані феросплави (ферохром, феромарганець і марганець металевий). Виробництво цих легуючих добавок, унаслідок малих швидкостей дифузії азоту, вимагає високих температур (900-1400 ^{0}C) і є дуже тривалим (до 220 годин) і енергоємним (~1250 кВт·год./т) процесом, що

визначає високу вартість продукції та істотно знижує ефективність її застосування.

У зв'язку з цим останнім часом переважають тенденції до використання у якості легуючої речовини дешевших і поширеніших азотовмісних матеріалів, таких як селітра (натрієва, калійна, амонійна), карбамід, амідів і ціанамідів.

Застосування таких речовин при виробництві азотовмісних лігатур. Суть способу полягає в тому, що при нагріванні суміші активного наповнювача і азотовмісної твердої добавки до температури, що забезпечує її плавлення без розкладання, остання виконує роль зв'язки. При охолоджуванні азотовмісна добавка кристалізується, чим досягається окускування суміші. При легуванні такими лігатурами відбувається послідовне розкладання органічного азотоносія з виділенням атомарного азоту, що реагує із сталлю.

Використання подібного способу введення азоту в сталь повинне здійснюватися спільно з матеріалами, що підвищують розчинність азоту в сталі, що збільшує його засвоєння. До таких матеріалів можна віднести і ванадій.

1.6 Вибір оптимального способу легування сталі ванадієм

На підставі вищевикладеного матеріалу, в якому проаналізовані існуючі способи легування сталі ванадієм, напрямом для дослідження вибрано легування сталі окускованими сумішами в ковші із застосуванням матеріалів, що містять пентоксид ванадію (ванадієвий шлак), а у якості азотоносія – недефіцитні азотовмісні матеріали (селітра, карбамід).

Даний спосіб був вибраний з ряду причин, що враховують сучасні тенденції в легуванні сталі, дешевизну і поширеність використовуваних матеріалів:

1. Останнім часом тенденція до винесення процесів рафінування і легування сталі за межі печі розповсюджується повсюдно. Напівпродукт, що виплавляється в печі, піддається доведенню на агрегатах позапічного

рафінування вже знаходячись в ковші. Це дозволяє скоротити час знаходження сталі в печі, зменшує енерговитрати і витрату матеріалів. Оскільки пропоновані для легування суміші, що складаються з оксиду ванадію, відновника і азотовмісної речовини, є екзотермічними, то раціональним буде їх використання шляхом введення в ківш при випуску сталі з печі.

2. В Україні відсутні промислові запаси ванадієвих руд, а незначна кількість його міститься в деяких родовищах поліметалічних руд. У зв'язку з цим встає питання витягання цінного матеріалу з побічних продуктів виробництва, одними з яких є зольні відходи роботи теплоелектростанцій, палива, що утворюються при спалюванні. Хоча цей спосіб і вимагає додаткових витрат, але дозволить вирішити питання утилізації вторинних продуктів виробництва.

На сьогодні розроблені технології, що дозволяють витягувати ванадійвмісні матеріали з відходів різних виробництв. Ці матеріали можуть надалі застосуються при виробництві феросплавів, ванадійвмісних лігатур і для прямого легування сталі і чавуну.

3. Оскільки метою легування є отримання сталі зміцненими карбідами і карбонітридами ванадію, то необхідною умовою є наявність необхідної кількості в сталі азоту. У зв'язку з цим виникає необхідність спеціального введення азоту, що досягається додаванням в легуючу суміш азотвмісної речовини. Це речовина при згоранні суміші в ковші з металом розкладається, виділяє атомарний азот, який значно активніше молекулярного реагує з металом. Даний метод дозволяє понизити витрати на легування азотованими феросплавами і досягти більшого засвоєння азоту металом.

4. Суміші призначені для легування необхідно заздалегідь окускувати з метою зменшення чаду і вильоту пилоподібних компонентів, тіснішого контакту відновника з оксидами, а також зручної присадки в ківш. Останнім часом одним з найчастіше використовуваних способів окускування є брикетування. Брикети виготовляються з суміші, потім їх висушуються і використовуються для легування, тобто технологія їх виробництва проста,

дешева і в теж час практично не має недоліків [5– 7].

Таким чином, використовуючи матеріали і досвід легування сталі ванадієм можна вважати одним з перспективних напрямів в даному питанні пряме легування сталі ванадієм з використанням ванадійвмісних вторинних матеріалів.

1.7 Мікроструктура сталі, легованої ванадієм, молібденом та бором

Мікролегування сталі ванадієм в кількості 0,1% (рис. 1.2) призводить до рівномірного подрібнення зерна у литому стані [2]. Наслідком цього є зміна механічних властивостей по відношенню до зразка без введення ванадію (рис. 1.3).

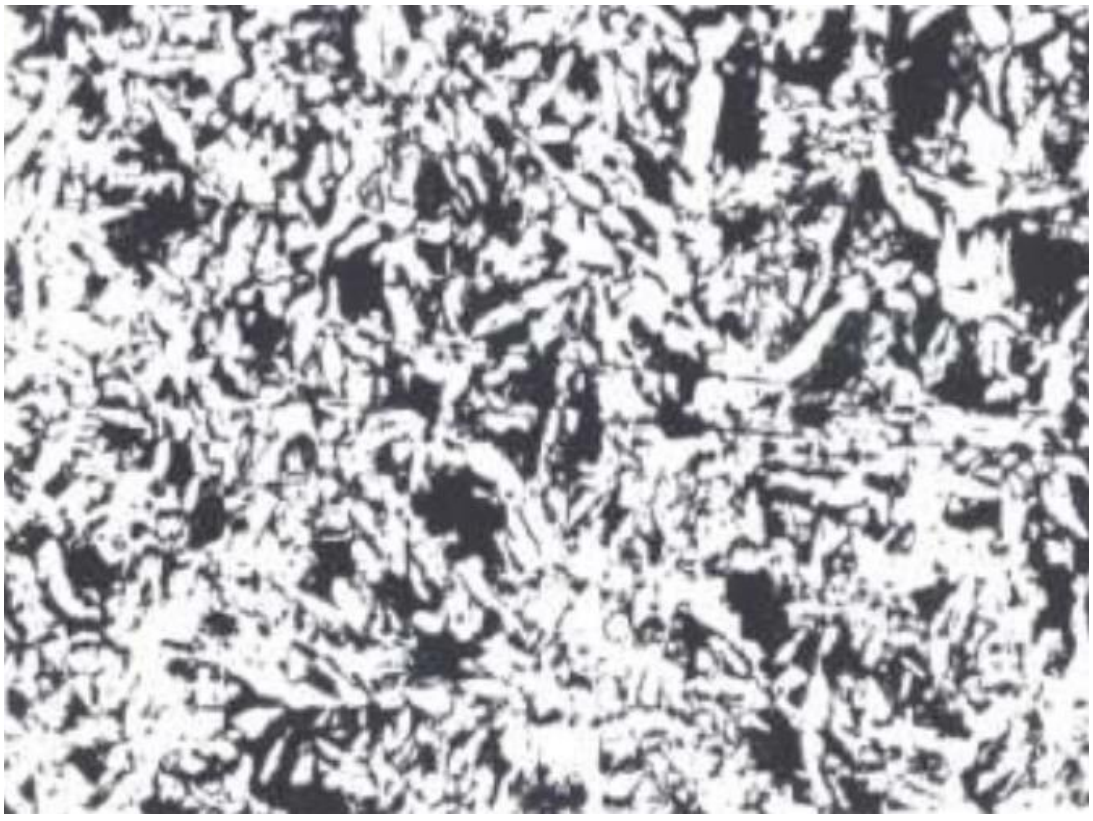


Рисунок 1.2 – Мікроструктура литої сталі з 0,1% ванадію, х 100

Наслідок введення молібдену у кількості 0,2% (рис. 1.4) – структура сталі стала она стала більш дрібнішою та набула голчастого характеру.

Бор у кількості 0,005% надає негативний вплив на пластичні властивості та ударну в'язкість сталі (рис. 1.5).

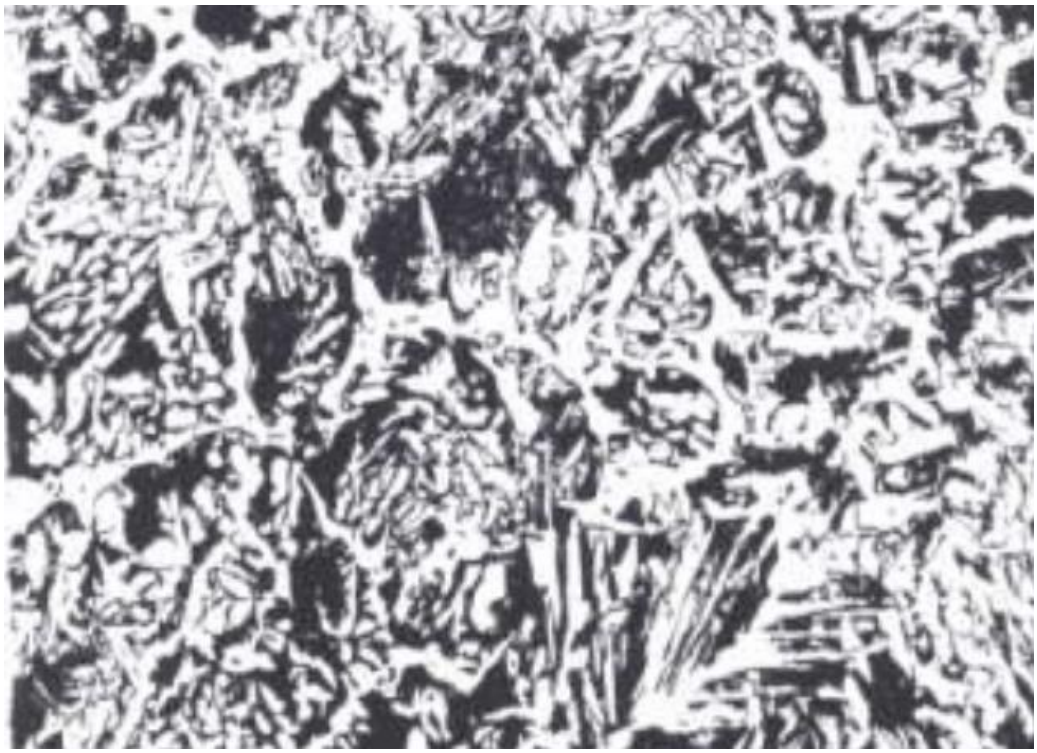


Рисунок 1.3 – Мікроструктура початкової литої сталі, х 100

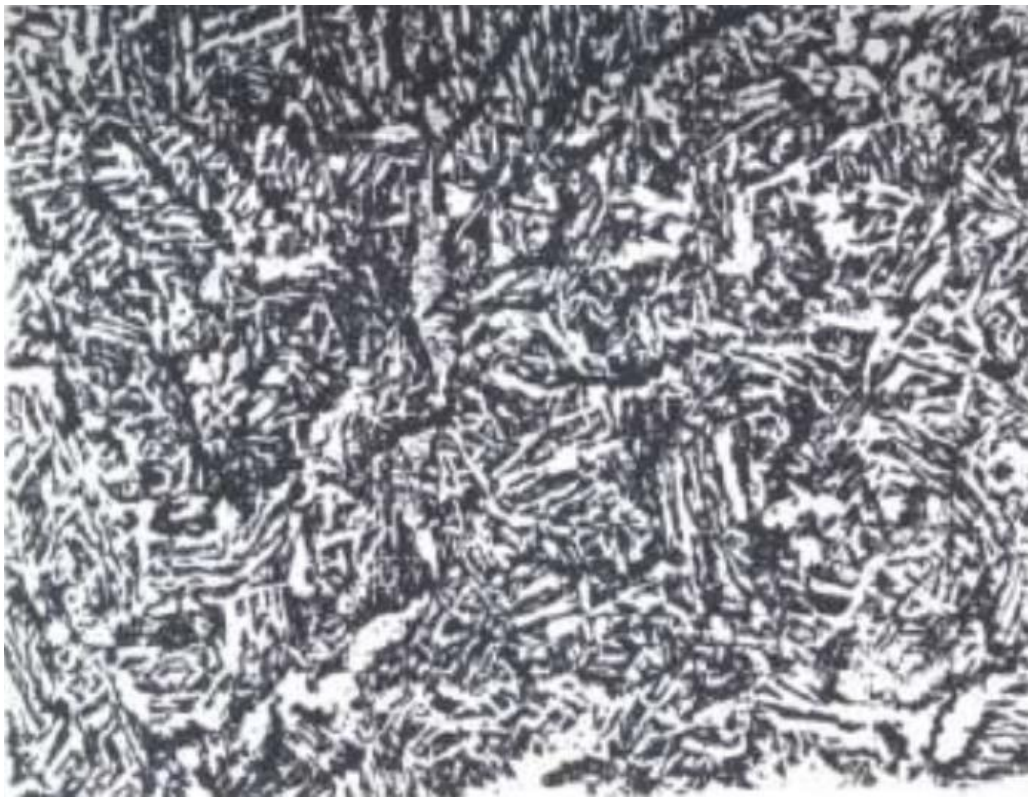


Рисунок 1.4 – Мікроструктура литої сталі з 0,2% молібдена, х 100

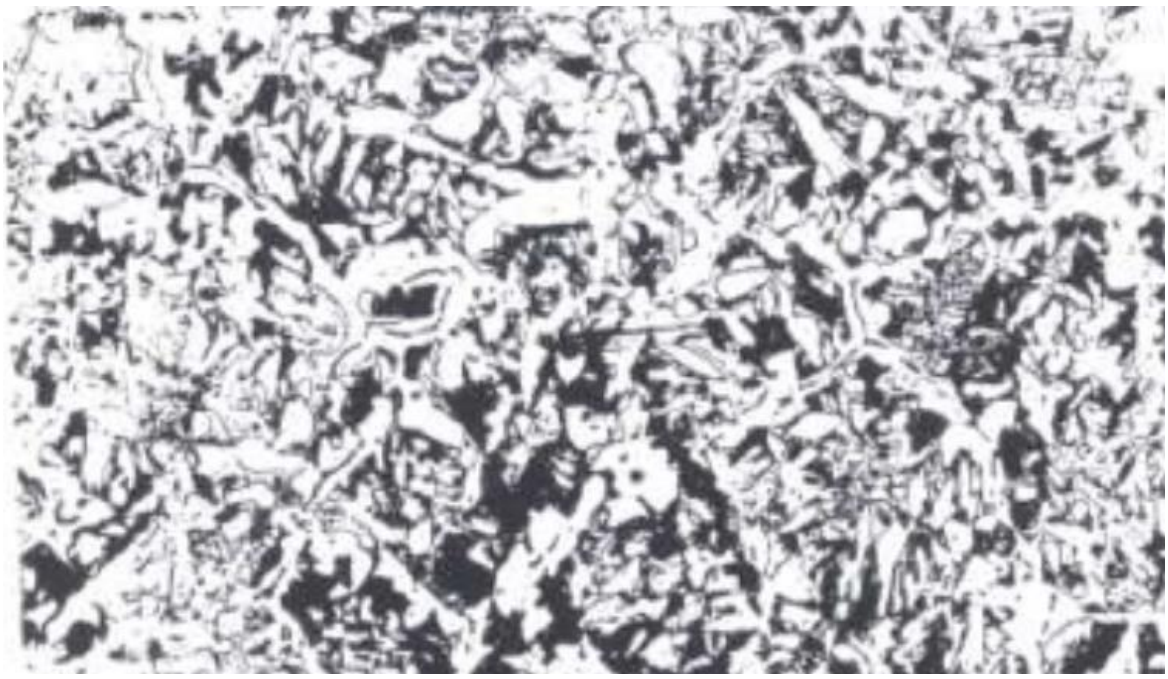


Рисунок 1.5 – Мікроструктура литої сталі з 0,005% бора, х 100

1.8 Висновки

1. На основі аналізу сьогоденних способів легування сталі ванадієм показано доцільність легування сталі окускованими сумішами в ковші із застосуванням матеріалів, що містять пентоксид ванадію (ванадієвий шлак).

2 ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір відновника

В якості основних відновників ванадію в промисловості використовують вуглець, кремній, алюміній та кальцій. Однак, як показують практичні данні, використання у якості відновника однієї речовини пов'язане з певними труднощами. Тому перспективним представляється використання комплексу відновників. Комплексне використання відновників дозволяє уникнути труднощів зв'язаних при використанні одного відновника.

В даній роботі запропоновано використання чотирьох варіантів приготування комплексних сумішей:

1. Варіант 1 - ванадійвмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію і вуглецю.

2. Варіант 2 - ванадійазотовмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію, а азотовмісної речовини – натрієвої селітри;

3. Варіант 3 - ванадійазотовмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію і вуглецю, а азотовмісної речовини натрієвої селітри і ціанаміду кальцію;

4. Варіант 4 - ванадійазотовмісна суміш з використанням у якості відновника вуглецю, кремнію і кальцію, а азотовмісної речовини – натрієвої селітри і ціанаміду кальцію.

В якості шихтових матеріалів для приготування суміші використовується ванадієвий шлак, феросиліцій марки ФС-75 (75-80%Si, 0,02% S, 0,05% P, 0,4% Mn, 0,4% Cr), коксик, натрієва селітра, ціанамід кальцію, силікокальцій марки СК-30 (>30%Ca, >50% Si, <0,5%C, <0,02%P, <2% Al), вапняк. При проведенні розрахунків сумішей враховували необхідність введення в сталь не менше 0,11% ванадію і 0,015% азоту.

2.2 Методика дослідження сумішей для легування сталі ванадієм і азотом

Першим етапом досліджень сумішей для легування сталі ванадієм і азотом був процес брикетування. Базовим складом брикетів була прийнята екзотермічна суміш за варіантом 3 - ванадійазотовмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію і вуглецю та у якості азотовмісної речовини - натрієвої селітри і ціанаміду кальцію.

Шихтові матеріали заздалегідь розмелювалися до фракції 2 мм. В якості речовини, що пов'язує, виступав водний розчин сульфіт-спиртової барди (ССБ) при щільності розчину 1,18 г/см^3. Відробіток технології брикетування вівся на лабораторному брикет-пресі (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Лабораторний брикет-прес

Для розробки технології брикетування сумішей досліджували зміну властивостей міцності брикетів залежно від питомого тиску пресування, кількості речовини, що пов'язує, і вологості. Шихту для брикетування

перемішували в лабораторному змішувачі ємністю 30 $см^3$ з електричним обігрівом. Після підігріву шихти до температури 30 ^{0}С додавали в неї водний розчин ССБ, заздалегідь нагрітий до 60 ^{0}С. Шихта перемішувалася до досягнення вологості приблизно 6%, після чого вивантажувалася в ексикатор.

Брикети циліндрової форми (діаметр 40 мм, висота 20-25 мм) виготовляли на лабораторному гідравлічному брикет-пресі. Величина питомого пресування складала 300 і 400 $кг/см^2$, а кількість речовини, що пов'язує щільністю 1,18 $г/см^3$ – 10 і 12% від ваги шихти.

Міцність брикетів визначали шляхом положення навантажень на тому ж пресі. Випробуванням піддавали як сирі брикети, вологість яких змінювалася в межах від 3 до 5,2%, так і висушених при 120 ^{0}С із залишковою вологістю 0,2-1%.

Другим етапом досліджень сумішей для легування сталі ванадієм і азотом був процес окомкування. В лабораторних умовах було вироблено три партії окатишів на основі ванадієвого шлаку з багатокомпонентних сумішей, відповідних варіантам 1, 3 і 4.

Подрібнені до фракції 2 мм компоненти шихти в заданій пропорції змішувалися в барабані-окомковаче типу ОБ-3,2 (рис. 2.2, таблиця 2.1).



Рисунок 2.2 – Барабан-окомковач

Усереднена шихта порціями подавалася на чашевий гранулятор, де зволожувалася розпорошеним водним розчином сульфіт-спиртової барди. Готові сирі окатиші відсівалися на ситі з діаметром отвору 10 мм і піддавалися або температурній сушці, або тривалому вилеживанні в критому приміщенні. Механічну міцність готового продукту визначали шляхом роздавлювання сирих окатишів різних фракцій після їх сушки і вилеживанні через 10, 20 і 30 діб на пресі МР-0,5-1 (рис. 2.3, таблиця 2.2).

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика барабанного окомковача типу ОБ-3,2

Технічна характеристика приладу	Значення
Продуктивність, т/ год.	514
Діаметр внутрішнього барабану, м	3,2
Довжина барабану, м	8
Кут нахилу вісі барабану, ^{0}	0,3…1,3
Частота обертів барабану, об./хв.	4,82…9,64
Потужність електродвигуна, кВт	60/90/120/200
Габаритні розміри, мм: довжина ширина висота	 10623 6123 5102
Маса, т	60

2.3 Висновки

1. Спираючись на те, що в якості основних відновників ванадію в промисловості використовують вуглець, кремній, алюміній та кальцій запропоновано використовувати в якості відновника кремній і вуглець.

2. При дослідженні процесу брикетування сумішей для легування сталі

ванадієм і азотом показано можливість використання чотирьох варіантів приготування цих сумішей:



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд розривної машини МР-0,5-1

Таблиця 2.2 – Технічна характеристика розривної машини МР-0,5-1

№ п/п	Технічна характеристика приладу	Значення
1	Найбільше навантаження при випробуванні, Н	5000
2	Граничне значення шкали навантаження, Н	шкала А - 5 000
3	Ціна поділу шкали, Н	шкала А - 10
4	Похибка показань навантаження від величини, що вимірюється , %	±1
5	Граничне значення шкали деформації, мм	200
6	Ціна поділу шкали деформації, мм	1

7	Похибка виміру деформації за шкалою, мм	±1

– ванадійвмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію і вуглецю;

– ванадійазотовмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію, а азотовмісної речовини – натрієвої селітри;

– ванадійазотовмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію і вуглецю, а азотовмісної речовини натрієвої селітри і ціанаміду кальцію;

– ванадійазотовмісна суміш з використанням у якості відновника вуглецю, кремнію і кальцію, а азотовмісної речовини – натрієвої селітри і ціанаміду кальцію.

3 ТЕРМОДИНАМІЧНІ ОСНОВИ ВІДНОВЛЕННЯ ВАНАДІЮ З ПЕНТОКСИДУ ВАНАДІЮ ТА РОЗРАХУНОК СКЛАДУ ЛЕГУЮЧИХ СУМІШЕЙ

3.1 Термодинамічні основи відновлення ванадію з пентоксиду ванадію

Знання фізико-хімічних закономірностей процесів відновлення ванадієвих шлаків є необхідною умовою ефективнішого використання їх для прямого легування сталі ванадієм. Правильний вибір відновника і відповідна його підготовка в значній мірі визначають техніко-економічні показники процесу. В ролі основних відновників ванадію в промисловості використовуються вуглець, кремній, алюміній і кальцій. Проте економічно вигідно застосовувати вуглець, кремній і алюміній. Найширше використовують вуглець, а якщо необхідно запобігти навуглецювання металу, то застосовують дорожчий кремній і алюміній. Розглянемо процеси відновлення кожним з цих елементів окремо [8–12].

3.1.1 Відновлення вуглецем

В якості вуглецьвмісного відновник можуть бути використані різні матеріали: деревне, буре і кам'яне вугілля, нафтове, пековий або кам'яновугільний кокс, різний напівкокс, деревні відходи та ін.

Закономірності відновлення елементів з ванадієвого шлаку вуглецем рідкого напівпродукту. Досліди проводилися в індукційній печі з магнезитовою футеровкою при 1250, 1350, 1450 ^{0}C.

Для дослідження були узяті шлаки хімічного складу, приведеного у таблиці 3.1.

Значення швидкостей відновлення ванадію K_V та заліза K_{Fe} з ванадієвих

шлаків представлені в таблиці 3.2.

У шлаку 1 таблиці 3.2. зміна вмісту окисленого заліза за ходом плавки не перевищувало 6,6% (абс.). У шлаку 2 у зв'язку з великими швидкостями відновлення вміст окисленого заліза знижується майже на 19%. Концентрація ванадію у вуглецевому напівпродукті в процесі взаємодії його з шлаком монотонно зростає від 0,05-0,08% до 0,14…0,17%.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад шлаку, %

Шлак	V_2O_5	$Fe_{çàã}$	MnO	TiO_2	Cr_2O_3	SiO_2	CaO	MgO
1	13,4	34,5	6,9	7,3	7,1	18,0	0,9	2,0
2	9,8	41,2	5,9	5,7	1,7	16,6	4,3	3,3

Таблиця 3.2 – Результати дослідів по відновленню ванадієвих шлаків

Шлак	$K_{Fe}\cdot 10^6$, $\frac{г\cdot ат}{см^2\cdot с}$				$K_V\cdot 10^7$, $\frac{г\cdot ат}{см^2\cdot с}$
	Період взаємодії, хв.				
	<20	20…40	40…80	80...120	
1	2,31	3,4	1,2	1,04	2,17
2	10,10	4,92	1,85	1,40	1,24

Встановлена кінетика відновлення ванадієвих шлаків вуглецем розплавів $Fe-C_{нас}$ в широкому інтервалі від 1250 до 1550 ^{0}С. Експерименти проводили з шлаками наступного складу, представленого в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Хімічний склад шлаку, у %

Шлак	V_2O_5	$Fe_{заг}$	MnO	TiO_2	Cr_2O_3	SiO_2	CaO	MgO
НТМК	11,5…16,2	38,5	7,2	10,1	1,4	18,1	0,4	1,0
ЧУСМЗ	12,3…13,5	34,5	6,9	7,3	7,1	18,0	0,9	2,0

У всіх дослідах спостерігали зниження вмісту $Fe_{çàã}$в шлаку. Шлак НТМК

при 1550 ^{0}C після 20 хв. взаємодії відновлюється практично повністю.

Концентрація ванадію в металі при відновленні шлаку досягає при 1250 ^{0}C – 0,06% (витримка 40-60 хв.), при 1350 ^{0}C – 0,12% (20-30 хв.), при 1450 ^{0}C – 0,23% (6 хв.) і при 1550 ^{0}C – 0,81% (20 хв.).

При аналізі отриманих закономірностей зміни складу шлаку виходять з протікання реакцій прямого:

$$(MeO)_{шл} + [C] = [Me] + \{CO\} \quad (3.1)$$

і непрямого відновлення:

$$(MeO)_{шл} + \{CO\} = [Me] + \{CO_2\}. \quad (3.2)$$

Результати дослідів [9,10] говорять про принципову можливість відновлення ванадію з ванадієвих шлаків вуглецевим напівпродуктом або вуглецем при температурі рідкої сталі. Це обумовлено, очевидно, тим, що оксиди вуглецю віддаляються із зони реакції, сприяючи повнішому протіканню реакції. Лімітуючим чинником в цьому способі відновлення є поступове утворення на реакційних поверхнях фази карбіду (VC), тому максимальне відновлення ванадію відбувається в перші 10–20 хв. витримки.

3.1.2 Відновлення кальцієм і алюмінієм

Відновлення ванадієвого шлаку кальцієм і алюмінієм відбувається за одним принципом, оскільки дані елементи схожі за своєю активністю:

$$5Ca + V_2O_5 = 5CaO + V, \quad (3.3)$$

$$10Al + 3V_2O_5 = 6V + 5Al_2O_3. \quad (3.4)$$

Дані реакції є різко екзотермічними, у зв'язку з цим ці відновники застосовуються в основному для отримання металевого ванадію і феванадію.

Перевагою відновлення кальцієм є швидкість і повнота протікання реакції. Проте для повного відновлення потрібна перевитрата кальцію в порівнянні з теоретично необхідним на 40–50%, що не виправдовує застосування кальцію з економічної точки зору. Також реакція відновлення ванадієвого шлаку носить бурхливий характер, особливо при температурі рідкої сталі, що може викликати викиди шлаку і сталі, а отже вимагає розбавлення шихти третім матеріалом (флюсом).

Проведені досліди по отриманню металевого ванадію з пентоксиду ванадію з використанням у якості відновника кальцію. У всіх роботах показана необхідність перевитрати кальцію від 50 до 60% від теоретично необхідного. Внаслідок чого витягання ванадію збільшується до74–84%. Температура реакції відновлення перевищувала 1900 ^{0}C.

Алюміній, який застосовується для виробництва феванадію, є активним відновником і не вимагає додаткових витрат тепла ззовні також як і кальцій. Алюмінотермічне відновлення, при температурах процесу характеризується значною зміною ΔG (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Зміна енергії Гіббса, теплові ефекти і питомі теплоти процесу алюмотермічного відновлення

Реакція	ΔG^0, Дж/моль O_2, при 1000-1800 ^{0}C	ΔH^0, Дж/моль	δH, кДж/г·атом
$V_2O_5 \rightarrow V$	-441707+24,7T	475746	115,14

Проте застосування алюмінію для відновлення ванадієвого шлаку при вибраному способі обмежується порядком чинників, до яких можна віднести високу пожежабезпеку порошку алюмінію, бурхливе протікання реакції, а також утворення значної кількості глиноземистого шлаку. До того ж алюміній достатньо дорогий відновник.

3.1.3 Відновлення кремнієм

Відновлення V_2O_5 кремнієм відбувається за реакціями:

$$2/5V_2O_5 + Si = 4/5V + SiO_2, \quad \Delta G_T^0 = -326026 + 75{,}24T. \tag{3.5}$$

Одночасно можуть утворюватися нижчі оксиди V_2O_3 і VO. Зміна ізобарно-ізотермічного потенціалу для реакцій:

$$2/3V_2O_3 + Si = 4/3V + SiO_2, \ \Delta G_T^0 = -105038 + 54{,}76T, \tag{3.6}$$

$$2VO + Si = 2V + SiO_2, \ \Delta G_T^0 = -25414 + 50{,}37T. \tag{3.7}$$

при високій температурі має позитивне значення, що указує на трудність їх здійснення. Ці оксиди взаємодіють з кремнеземом, утворюючи силікати ванадію, з яких подальше відновлення ванадію ще більше утруднене, тому в шихту необхідно вводити вапно, що зв'язує кремнезем і що перешкоджає утворенню силікатів ванадію. У присутності оксиду кальцію реакція набуває вигляду:

$$2/5V_2O_5 + Si + 2CaO = 4/5V + 2CaO \cdot SiO_2, \ \Delta G_T^0 = -472564 + 75{,}27T. \tag{3.8}$$

Кремній у якості відновника відносно дешевий і може бути використаний при виготовленні легуючих сумішей [8–12].

3.2 Розрахунок відновника

Як видно з вищенаведених закономірностей відновлення елементів з

ванадієвого шлаку тим або іншим елементом, використання у якості відновника однієї речовини пов'язане з певними труднощами. Тому перспективним представляється використання комплексу відновників. Так в роботі при використання у якості відновника порошкоподібного алюмінію і кремнію з складу некондиційної кремнійвмісної лігатури. Перехід ванадію з шлаку досягав 94% при повному засвоєнні ванадію лігатури.

Комплексне використання відновників дозволяє уникнути труднощів зв'язаних при використанні одного відновника. Наприклад, при сумісному відновленні вуглецем і кремнієм, оксид кремнію, що утворюється, перешкоджає утворенню важковідновлювальних карбідів ванадію, а сумісне використання кремнію і кальцію (або кремнію, алюмінію і кальцію) дозволяє досягти багатокомпонентного легкоплавкого шлаку, замість однокомпонентного в'язкого вапняного або глиноземистого шлаку.

Розрахунок складу ванадійвмісних і ванадійазотовмісних сумішей проводили з урахуванням повного відновлення ванадію, марганцю, хрому і заліза з ванадієвого шлаку для наступних варіантів:

1. Ванадійвмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію і вуглецю.
2. Ванадійазотовмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію, а азотовмісної речовини – натрієвої селітри;
3. Ванадійазотовмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію і вуглецю, а азотовмісної речовини натрієвої селітри і ціанаміду кальцію;
4. Ванадійазотовмісних суміш з використанням у якості відновника вуглецю, кремнію і кальцію, а азотовмісної речовини – натрієвої селітри і ціанаміду кальцію.

Хімічний склад елементів легуючих сумішей приведений в таблиці 3.5.

Відновлення ванадію кремнієм, вуглецем і кальцієм з шлаку, в якому він знаходиться у вигляді п’ятиокис і, відбувається за наступними реакціями (3.9-3.11):

$$V_2O_5 + 5C = 2V + 5CO, \quad (3.9)$$

$$2V_2O_5 + 5Si = 4V + 5SiO_2, \quad (3.10)$$

$$V_2O_5 + 5Ca = 2V + 5CaO. \quad (3.11)$$

Залізо, марганець і хром відновлюються згідно реакціям (3.12-3.20):

$$2FeO + Si = 2Fe + SiO_2, \quad (3.12)$$

$$2MnO + Si = 2Mn + SiO_2, \quad (3.13)$$

$$2Cr_2O_3 + 3Si = 4Cr + 3SiO_2, \quad (3.14)$$

$$FeO + C = Fe + CO, \quad (3.15)$$

$$MnO + C = Mn + CO, \quad (3.16)$$

$$Cr_2O_3 + 3C = 2Cr + 3CO, \quad (3.17)$$

$$FeO + Ca = Fe + CaO, \quad (3.18)$$

$$MnO + Ca = Mn + CaO, \quad (3.19)$$

Таблиця 3.5 – Хімічний склад елементів легуючих сумішей

Шихтові матеріали	V_2O_5	TiO_2	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	Al	Si	$Fe_{мет}$	C	P_2O_5
Ванадієвий конвертерний шлак	15,2	4,1	18,0	3,2	1,5	1,3	1,9	34,1	8,1	–	–	8,5	–	0,07
Феросиліцій ФС-75	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,5	78,5	20,5	–	–
Силікокальцій СК-30	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2,0	60,9	5,5	0,5	0,04

$$Cr_2O_3 + 3Ca = 2Cr + 3CaO. \qquad (3.20)$$

Азотування рідкого металу при використанні натрієвої селітри і ціанаміду кальцію відбувається шляхом поглинання вільного азоту який виділяється в результаті термічного розкладання цих речовин при контакті із сталлю. Ціанамід кальцію стійкий до 1090 ^{0}C, а при вищій температурі переганяється і частково розкладається за реакцією:

$$CaCN_2 + C = CaC_2 + N_2. \qquad (3.21)$$

Натрієва селітра взаємодіє з елементами-відновниками з суміші, виділяючи вільний азот за реакцією [8-12]:

$$4NaNO_3 + 5Si = 5SiO_2 + 2Na_2O + 2N_2. \qquad (3.22)$$

Розрахунок відновника проводився на тонну сталі з урахуванням введення не менше 0,11% ванадію і не менше 0,015% азоту.

Загальні дані для розрахунків наступні:

а) хімічний склад елементів суміші і відновників приведений в таблиці 3.5.

б) молярні маси речовин наступні: M(V)=51, M(V_2O_5)=182, M(Fe)=56, M(FeO)=72, M(Mn)=55, M(MnO)=71, M(Cr)=52, M(Cr_2O_3)=152, M(C)=12, M(Si)=28, M(Ca)=40, M($NaNO_3$)=85, M($CaCN_2$)=80.

в) із співвідношення $V_2O_5 = 2V$ знаходимо масу чистого пентоксиду ($V_2O_{5\ \text{÷èñòèé}}$) і ванадієвого шлаку (ВШ):

$$m(V_2O_{5\ чистий}) = \frac{182 \cdot 1.1}{2 \cdot 51} = 1{,}963\ кг,$$

$$m(ВШ) = \frac{1{,}963}{0{,}152} = 12{,}914\ кг.$$

Отже кількість, MnO і Cr_2O_3 у ванадієвому шлаку складає:

$$m(FeO) = \frac{12{,}914 \cdot 34{,}1}{100} = 4{,}404\ кг,$$

$$m(MnO) = \frac{12{,}914 \cdot 8.1}{100} = 1{,}046\ кг,$$

$$m(Cr_2O_3) = \frac{12{,}914 \cdot 1{,}9}{100} = 0{,}245\ кг.$$

3.2.1 Розрахунок відновника за першим варіантом

Відновлення відбувається за реакціями:

$$V_2O_5 + 5C = 2V + 5CO, \qquad (3.23)$$

$$2V_2O_5 + 5Si = 4V + 5SiO_2. \qquad (3.24)$$

З реакцій 3.23, 3.24 видно, що однакову кількість кремнію і вуглецю відновлюють відповідно дві і одну третину пентоксиду ванадію, отже така кількість відновника і приймемо в розрахунках.

Маси чистого вуглецю і коксу для відновлення ванадію:

$$m(C_{V_2O_5})_1 = \frac{\frac{1{,}963}{3} \cdot 5 \cdot 12}{182} = 0{,}216\ кг,$$

$$m(кокс_{FeO})_1 = \frac{0{,}216}{0{,}87} = 0{,}248\ кг.$$

Маси чистого кремнію і феросиліцію для відновлення ванадію:

$$m(Si_{V_2O_5})_1 = \frac{\frac{2 \cdot 1{,}963}{3} \cdot 5 \cdot 28}{2 \cdot 182} = 0{,}503\ кг,$$

$$m(FeSi_{V_2O_5})_1 = \frac{0{,}503}{0{,}785} = 0{,}641\ кг.$$

Маси чистого вуглецю і коксу для відновлення заліза:

$$m(C_{FeO})_1 = \frac{\frac{4{,}404}{3} \cdot 12}{72} = 0{,}245\ кг.$$

$$m(кокс_{FeO})_1 = \frac{0{,}245}{0{,}87} = 0{,}281\ кг.$$

Маси чистого кремнію і феросиліцію для відновлення заліза:

$$m(Si_{FeO})_1 = \frac{\frac{2 \cdot 4{,}404}{3} \cdot 28}{2 \cdot 72} = 0{,}571\ кг,$$

$$m(FeSi_{FeO})_1 = \frac{0{,}571}{0{,}785} = 0{,}727\ кг.$$

Маси чистого вуглецю і коксу для відновлення марганцю:

$$m(C_{MnO})_1 = \frac{\frac{1{,}046}{3} \cdot 12}{71} = 0{,}059\ кг,$$

$$m(кокс_{MnO})_1 = \frac{0{,}059}{0{,}87} = 0{,}068\ кг.$$

Маси чистого кремнію і феросиліцію для відновлення марганцю:

$$m(Si_{MnO})_1 = \frac{\frac{2 \cdot 1{,}046}{3} \cdot 28}{2 \cdot 71} = 0{,}138\ кг,$$

$$m(FeSi_{MnO})_1 = \frac{0{,}138}{0{,}785} = 0{,}175\ кг.$$

Маси чистого вуглецю і коксу для відновлення хрому:

$$m(C_{Cr_2O_3})_1 = \frac{\frac{0{,}245}{3} \cdot 3 \cdot 12}{152} = 0{,}019\ кг,$$

$$m(кокс_{Cr_2O_3})_1 = \frac{0{,}019}{0{,}87} = 0{,}022\ кг.$$

Маси чистого кремнію і феросиліцію для відновлення хрому:

$$m(Si_{Cr_2O_3})_1 = \frac{\frac{2 \cdot 0{,}245}{3} \cdot 3 \cdot 28}{2 \cdot 152} = 0{,}045\ кг,$$

$$m(FeSi_{MnO})_1 = \frac{0{,}045}{0{,}785} = 0{,}057\ кг.$$

Витрата відновника і легуючої суміші складе:

$$\sum m(кокс) = 0{,}248 + 0{,}281 + 0{,}068 + 0{,}022 = 0{,}619\ кг / т\ сталі,$$

$$\sum m(FeSi) = 0{,}641 + 0{,}727 + 0{,}175 + 0{,}057 = 1{,}6\ кг / т\ сталі,$$

$$\sum m(суміші) = 0{,}619 + 1{,}6 + 12{,}914 = 15{,}133\ кг / т\ сталі.$$

3.2.2 Розрахунок відновника за другим варіантом

Відновлення відбувається за реакцією:

$$2V_2O_5 + 5Si = 4V + 5SiO_2, \qquad (3.25)$$

а розкладання натрієвої селітри за реакцією:

$$4NaNO_3 + 5Si = 5SiO_2 + 2Na_2O + 2N_2. \qquad (3.26)$$

На одну тонну сталі необхідно ввести 0,15 кг, отже витрата селітри буде наступною:

$$m(NaNO_3) = \frac{4 \cdot 85 \cdot 0.15}{2 \cdot 28} = 0{,}911\ кг.$$

Кількість кремнію і феросиліцію для відновлення селітри:

$$m(Si_{NaNO_3})_2 = \frac{0{,}911 \cdot 5 \cdot 28}{4 \cdot 85} = 0{,}375\ кг.$$

$$m(FeSi_{NaNO_3})_2 = \frac{0{,}375}{0{,}785} = 0{,}478\ кг.$$

Кількість кремнію для відновлення шлаку складе (виходячи з попереднього пункту з урахуванням 100% відновлення):

$$m(FeSi_{ВШ})_2 = 1{,}6 + \frac{1}{3} \cdot 1{,}6 = 2{,}133\ кг.$$

Сумарна маса відновника і суміші складе:

$$\sum m(FeSi) = 0{,}478 + 2{,}133 = 2{,}611\ кг / т\ сталі,$$

$$\sum m(суміші) = 2{,}611 + 12{,}914 + 0{,}911 = 16{,}436\ кг / т\ сталі.$$

3.2.3 Розрахунок відновника за третім варіантом

Для третього варіанту змішай кількість вуглецю і кремнію для відновлення ванадієвого шлаку складе таку ж кількість, як і в першому варіанті, а для ціанаміду кальцію і натрієвої селітри приймаємо, що співвідношення їх в суміші складе 1:1. Складаємо нерівність щодо маси цих речовин (х – маса кожної речовини):

$$\frac{2 \cdot 28 \cdot x}{4 \cdot 85} + \frac{28 \cdot x}{80} = 0{,}15,\ x = 0{,}291\ кг.$$

Маса вуглецю і коксу на відновлення ціанаміду кальцію:

$$m(C_{CaCN_2})_3 = \frac{0{,}291 \cdot 12}{80} = 0{,}044\ кг,$$

$$m(кокс_{CaCN_2})_3 = \frac{0{,}044}{0{,}8} = 0{,}05\ кг.$$

Маса кремнію і феросиліцію на відновлення селітри:

$$m(Si_{NaNO_3})_3 = \frac{0{,}291 \cdot 5 \cdot 28}{4 \cdot 85} = 0{,}12\ кг,$$

$$m(FeSi_{NaNO_3})_3 = \frac{0{,}12}{0{,}785} = 0{,}153\ кг.$$

Загальна маса відновника і суміші за третім варіантом складе:

$$\sum m(кокс) = 0{,}619 + 0{,}05 = 0{,}669\ кг / т\ сталі,$$

$$\sum m(FeSi) = 1{,}6 + 0{,}153 = 1{,}753\ кг / т\ сталі,$$

$$\sum m(суміші) = 0{,}669 + 1{,}753 + 0{,}291 + 0{,}291 + 12{,}914 = 15{,}918\ кг / т\ сталі.$$

3.2.4 Розрахунок відновника за четвертим варіантом

Четвертий варіант припускає відновлення шлаку кремнієм і кальцієм, а введення азоту за рахунок нітрату натрію і ціанаміду кальцію. Передбачається, що вуглець, що вводиться, використовується для відновлення ціанаміду кальцію. Для спрощення розрахунку приймаємо, що силікокальцій містить 30% кальцію і 70% кремнію. Виходячи з цього співвідношення і з того, що необхідно відновити 1,963 кг пентоксиду ванадію, 4,404 кг FeO, 1,046 кг MnO, 0,245 Cr_2O_3 складаємо рівняння:

– витрата силікокальцію на відновлення пентоксиду ванадію:

$$\frac{2 \cdot 182 \cdot 2{,}333 \cdot x}{5 \cdot 28} + \frac{182 \cdot x}{5 \cdot 40} = 1{,}963, \quad x = 0{,}281\ кг,$$

$$m(SiCa_{V_2O_5})_4 = x + 2{,}333x = 0{,}281 + 2{,}333 \cdot 0{,}281 = 0{,}938\ кг.$$

– витрата силікокальцію на відновлення окислу заліза:

$$\frac{2 \cdot 72 \cdot 2{,}333 \cdot x}{28} + \frac{72 \cdot x}{40} = 4{,}404, \quad x = 0{,}319\ кг,$$

$$m(SiCa_{FeO})_4 = x + 2{,}333x = 0{,}319 + 2{,}333 \cdot 0{,}319 = 1{,}063\ кг.$$

– витрата силікокальцію на відновлення окислу марганцю:

$$\frac{2 \cdot 71 \cdot 2{,}333 \cdot x}{28} + \frac{71 \cdot x}{40} = 1{,}046, \quad x = 0{,}076 \; кг,$$

$$m(SiCa_{MnO})_4 = x + 2{,}333x = 0{,}076 + 2{,}333 \cdot 0{,}076 = 0{,}253 \; кг.$$

– витрата силікокальцію на відновлення оксиду хрому:

$$\frac{2 \cdot 152 \cdot 2{,}333 \cdot x}{3 \cdot 28} + \frac{152 \cdot x}{3 \cdot 40} = 0{,}245, \quad x = 0{,}025 \; кг,$$

$$m(SiCa_{Cr_2O_3})_4 = x + 2{,}333x = 0{,}025 + 2{,}333 \cdot 0{,}025 = 0{,}084 \; кг.$$

– витрата кремнію і силікокальцію на відновлення натрієвої селітри:

$$m(Si_{NaNO_3})_3 = \frac{0{,}291 \cdot 5 \cdot 28}{4 \cdot 85} = 0{,}12 \; кг,$$

$$m(FeSi_{NaNO_3})_3 = \frac{0{,}12}{0{,}7} = 0{,}171 \; кг.$$

Маса відновника і суміші за четвертим варіантом складе:

$$\sum m(кокс) = 0{,}05 \; кг \,/\, т \; сталі,$$

$$\sum m(SiCa) = 0{,}938 + 1{,}063 + 0{,}253 + 0{,}084 + 0{,}171 = 2{,}509 \; кг \,/\, т \; сталі,$$

$$\sum m(суміші) = 0{,}05 + 2{,}509 + 0{,}291 + 0{,}291 + 12{,}914 = 16{,}055 \; кг \,/\, т \; сталі.$$

3.3 Розрахунок складу сумішей

Для остаточного ухвалення складу легуючих сумішей вирішено збільшити кількість відновника теоретично необхідним в 1,2–1,3 рази у зв'язку з можливим частковим окисленням елементів киснем повітря і селітри, а також можливу неоднорідність сумішей за складом. Також для поліпшення складу шлаку, що утворюється, створення ефекту барботажу за рахунок термічного розкладання було вирішено ввести до складу суміші за всіма варіантами вапняк в кількості близько 5% від загальної маси.

З урахуванням вищесказаного витрату ванадієвого шлаку, відновників, азотоносіїв і вапняку буде наступним (таблиця 3.6).

Таким чином, в результаті проведеного огляду можливих способів відновлення ванадієвого шлаку різними відновниками (вуглець, кремній, алюміній і кальцій) показана необхідність використання не одного, а декількох відновників одночасно. Виконаний розрахунок показав, що легуючі суміші складаються з 70–80% ванадієвого шлаку, 12–18% відновника, 4–5% вапняку і 2-6% азотовмісної речовини. Витрата легуючої суміші коливається у вузьких межах від 16 до 18 кг/т сталі.

3.4 Висновки

1. Проведено розрахунок складу ванадійвмісних і ванадійазотовмісних сумішей за чотирма варіантами.

2. В якості шихтових матеріалів для приготування суміші використовується ванадієвий шлак, феросиліцій марки ФС-75, коксик, натрієва селітра, ціанамід кальцію, силікокальцій марки СК-30, вапняк. При проведенні розрахунків сумішей враховували необхідність введення в сталь не менше 0,11% ванадію і 0,015% азоту.

Таблиця 3.6 – Склад сумішей для введення в сталь ванадію і ванадію спільно з азотом

Компонент суміші	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Ванадієвий шлак	$\frac{12{,}914}{78-80}$	$\frac{12{,}914}{72-73}$	$\frac{12{,}914}{74-76}$	$\frac{12{,}914}{76-77}$
Феросиліцій ФС-75	$\frac{1{,}92}{11-13}$	$\frac{3{,}133}{17-18}$	$\frac{2{,}104}{12-13}$	–
Коксик	$\frac{0{,}743}{4-5}$	–	$\frac{0{,}803}{4-5}$	$\frac{0{,}05}{\approx 1}$
Силікокальцій СК-30	–	–	–	$\frac{2{,}509}{14-16}$
Натрієва селітра	–	$\frac{0{,}911}{5-6}$	$\frac{0{,}291}{2-3}$	$\frac{0{,}291}{2-3}$
Ціанамід кальцію	–	–	$\frac{0{,}291}{2-3}$	$\frac{0{,}291}{2-3}$
Вапняк	$\frac{0{,}8}{4-5}$	$\frac{0{,}9}{5-6}$	$\frac{0{,}8}{4-5}$	$\frac{0{,}8}{4-5}$
Сумарна витрата	$\frac{16{,}377}{100}$	$\frac{17{,}858}{100}$	$\frac{17{,}203}{100}$	$\frac{16{,}855}{100}$

Примітка: чисельник – маса речовини в суміші, кг/т сталі,
знаменник – вміст речовини в суміші, %.

4 ДОСЛІДНЕ ВИПРОБУВАННЯ СУМІШЕЙ ДЛЯ ЛЕГУВАННЯ СТАЛІ ВАНАДІЄМ І АЗОТОМ

4.1 Обробка експериментальних даних брикетування та окомкування сумішей для легування сталі ванадієм і азотом

Базовим складом брикетів була прийнята екзотермічна суміш за варіантом 3 (таблиця 3.6). Міцність брикетів визначали шляхом положення навантажень на тому ж пресі. Випробуванням піддавали як сирі брикети, вологість яких змінювалася в межах від 3 до 5,2%, так і висушених при 120 ^{0}C із залишковою вологістю 0,2–1%.

В таблиці 4.1 приведені експериментальні дані про міцність брикетів на роздавлювання.

Таблиця 4.1 – Результати випробувань виготовлених партій брикетів на міцність

№ партії	Витрата ССБ, %	Питомий тиск пресування, кг/см^2	Міцність брикету, кг/брикет	
			сирого	висушеного при 120 ^{0}C
1	10	300	350…400	500…900
2	10	400	350…400	550…1000
3	12	300	350…400	850…1300
4	12	400	400…500	900…1400

З приведених даних видно, що підвищення витрати ССБ, питомого тиску пресування і сушка при 120 ^{0}C приводить до зміцнення брикетів. Висушені брикети всіх партій володіють високою міцністю, достатньою для їх транспортування. Досліджені діапазони коливання параметрів технології виготовлення брикетів (витрата ССБ – 10–12%, питомий тиск пресування – 300–400 кг/см^2 і сушка при 120 ^{0}C) рекомендовані для брикетування сумішей на

брикет-пресі.

Другим етапом досліджень сумішей для легування сталі ванадієм і азотом був процес окомкування. В лабораторних умовах було вироблено три партії окатишів на основі ванадієвого шлаку з багатокомпонентних сумішей, відповідних варіантам 1, 3 і 4.

В процесі окомкування вищезгаданих сумішей виявили, що речовина, що пов'язує (сульфіт-спиртова барда), володіє підвищеною в'язкістю, нерівномірно розподіляється в масі шихти, а отримані гранули (окатиші) мають блиноутворну і елипсоутворну форму.

Лабораторні дослідження показали, що в'язкість речовини, що пов'язує, можливо знизити шляхом підвищення температури розчину. Зміна відносній в'язкості розчину (співвідношення води ССБ дорівнюю 2,2) від температури нагріву визначалася на в’язкозіметрі Оствальда-Пімневіча (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – В’язкозіметр Оствальда-Пімневіча [10]

Дані досліджень приведені на рис. 4.2. Із збільшенням температури нагріву в'язкість розчину знижується. При цьому різке зниження в'язкості спостерігається при нагріві розчину до температури 60-90 ^{0}С. При підвищенні температури вище 90 ^{0}С зниження в'язкості розчину незначне. Тому надалі обробка шихт, що готуються, проводилася розпилюванням підігрітого (до

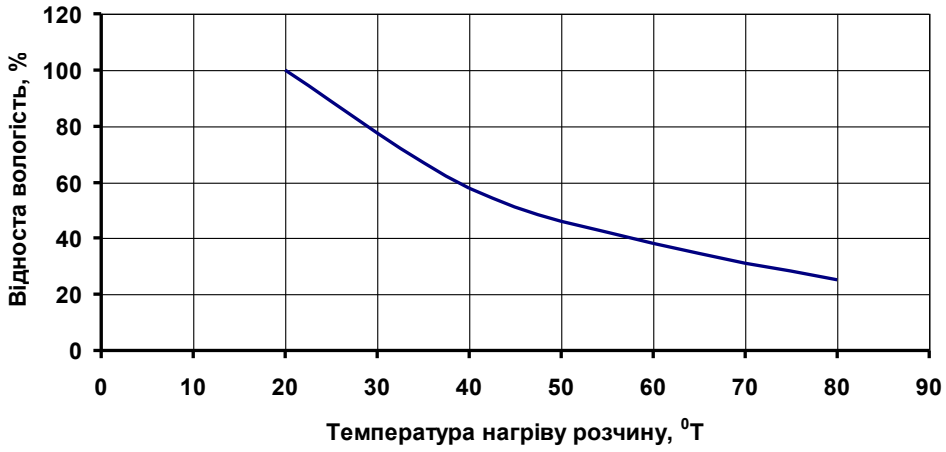


Рисунок 4.2 – Залежність відносної в'язкості розчину ССБ від температури нагріву розчину

температури 60–90 ^{0}С) розчину ССБ, що сприяло рівномірному розподілу речовини, що пов'язує, в масі шихти і, у свою чергу, забезпечувало отримання однорідних за великими гранулами кулястої форми. Параметри раціональної технології виробництва окатишів зазначені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри технології виробництва окатишів

Технічний параметр	Суміш варіанту 1	Суміш варіанту 2	Суміш варіанту 3
Число оборотів чаші гранулятора, об./хв.	13-14	10-11	13-14
Кут нахилу чаші, град.	42	40	40
Вологість шихти, %	10-11	8-9	8-9
Витрата речовини, що пов'язує, %	10	10	10
Температура розчину речовини, що пов'язує, ^{0}С	60-90	60-90	60.-90

При дотриманні даних умов технології можливо отримувати окатиші рівного гранулометричного складу (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3 – Гранулометричний склад окатишів

Розмір фракції, мм	Суміш варіанту 1	Суміш варіанту 2	Суміш варіанту 3
>20	38,3	40,2	37,1
20-15	52,0	53,0	51,9
15-10	9,7	6,8	11,0

Характеристики міцності окатишів приведена в таблиці 4.4. Показано, що найміцнішими окатишами є зразки з суміші першого варіанту. Встановлено, що максимальна міцність брикетів при зберіганні на повітрі в критому приміщенні досягається через десять діб.

Дослідним шляхом встановлено, що окатиші з суміші першого варіанту легко піддаються температурній сушці в стаціонарному шарі. Оптимальний час сушки при температурі 200–250 ^{0}С складає 1,5 год.

При цьому тривале вилежування окатишів в умовах повітря в приміщенні, що накривається, з суміші 1-го варіанту також підвищує їх міцність (таблиця 4.4).

Для сумішей 3-го і 4-го варіантів, до складу яких входить селітра, температурна сушка неприйнятна. Безпосередньо при температурах до 160 ^{0}С окатиші не досягають достатньої міцності, що видно з даних таблиці 4.3, а підвищення температури більше ніж 160 ^{0}С приводить до їх самозагорання.

Так міцність окатишів на основі ванадієвого шлаку мало залежить про їх розміру (таблиця 4.4), особливо для суміші варіанту 1. Це пояснюється тим, що на крупних окатишах (фракція >20 мм) в процесі сушки з'являються макротріщини [13].

Таблиця 4.4 – Залежність механічної міцності окатишів від тривалості зберігання

Варіант суміші	Температура сушки, ^{0}C	Фракція окатишів, мм	Тривалість зберігання, доба	Міцність на стиснення, кг/окатиш
1	200…250	20…15	1	63,1
			10	63,8
			20	69,0
			30	64,7
		> 20	1	68,7
			10	65,5
			20	71,0
			30	70,0
	–	20…15	1	8,9
			10	80,7
			20	77,5
			30	75,0
		>20	1	12,8
			10	93,8
			20	86,6
			30	84,3
2	–	15…10	1	4,3
			10	16,0
			20	20,2
			30	19,0
		20…15	1	3,2
			10	21,5
			20	21,3
			30	20,5
		> 20	1	2,1
			10	34,8
			20	30,2
			30	30,4
4	до 160	15…10	1	21,5
			10	22,0
			20	19,0
			30	20,0
		20…15	1	26,0
			10	25,0
			20	23,5
			30	24,0
		> 20	1	31,3
			10	33,0
			20	32,4
			30	33,3

4.2 Дослідне випробування брикетів і окатишів для легування сталі

Дослідне випробування сумішей для легування сталі проводили в лабораторних умовах. Сталь виплавляли в дугових сталеплавильних печах типу ДСП-3,2 (рис. 4.3) і ДСП-1,5 (рис. 4.4). Дослідження проводили на мало- і средньовуглецевій сталі із звичайним і підвищеним вмістом марганцю. Метал легували в печі феромарганцем, металевим марганцем і у ряді випадків 45-65% феросиліцієм; у ківш вводили феросиліцій, брикети або окатиші. На всіх плавках, вироблених в лабораторних умовах, в ківш додатково вводили алюміній.

Випуск плавок з електропечі проводився без затримки (або попереднього видалення) шлаку. Феросиліцій, брикети або окатиші вводили під струмінь металу на початку випуску плавки.



Рисунок 4.3 – Дугова сталеплавильна піч типу ДСП-3,2 [11]



Рисунок 4.4 – Дугова сталеплавильна піч типу ДСП-1,5 [12]

4.3 Висновки

1. Встановлено, що підвищення витрати речовини, що пов'язує, - сульфіт-спиртової барди з 10 до 12% та питомого тиску пресування (з 300 до 400 кг/см^2) при сушці при 120 ^{0}С приводить до зміцнення брикетів в 1,4 рази. Показано, що із збільшенням температури нагріву в'язкість сульфіт-спиртової барди знижується, особливо при нагріві розчину до температури 60-90 ^{0}С.

2. Дослідним шляхом встановлено, що найміцнішими окатишами є зразки, отримані з ванадійвмісної суміші з застосуванням у якості відновника кремнію і вуглецю. Максимальна міцність брикетів при зберіганні на повітрі в критому приміщенні досягається через десять діб.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів в лабораторії

Дослідження сумішей для легування сталі ванадієм і азотом, розрахунок складу сумішей, процес брикетування сумішей та їх дослідне випробування проводили в лабораторних умовах.

Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на працівника лабораторії, показав, що на людину негативно впливають:

– шум, що перевишує допустимі норми;
– підвищенна температура повітря;
– підвищенний рівень тепловиділення;
– небезпека ураження електричним струмом;
– надмірна запиленність і загазованність повітря та ін. [13–15].

5.2 Заходи щодо захисту від шкідливих і небезпечних чинників лабораторії

В роботі дослідне випробування сумішей для легування сталі проводили в лабораторних умовах, зокрема, сталь виплавляли в дугових сталеплавильних електропечах типу ДСП-3,2 і ДСП-1,5. Тому для робочого місця сталевара відповідно до гігієнічної класифікації приведена характеристика трудового процесу і оцінка чинників виробничого середовища (табл. 5.1).

Джерелом шуму в лабораторних умовах біля ДСП-3,2 є технологічні гази, що рухаються, при подачі їх у комунікації, вдмухуванні в печі. Рівні шуму на робочих місцях досягають до 90 дБА. Вібрацію можуть створювати ті ж агрегати, які є джерелами шуму.

Аналіз шкідливих факторів виробничого середовища, наведених у таблиці 5.1, дозволяє зробити наступний висновок про умови праці сталевара:

– оцінка технічного та організаційного рівня відповідає технологічному

регламенту та проекту організації праці на робочому місці;

– атестація робочого місця: робоче місце має в наявності 4 фактори 1 ступеня, 7 факторів 3 ступеня;

– умови роботи в лабораторних умовах біля ДСП-3,2 є досить важкими: II клас – 2 фактори, III клас – 3 фактори.

Таблиця 5.1 – Оцінка факторів виробничого та трудового процесу професія: сталевар, робоче місце – дугова сталеплавильна піч типу ДСП-3,2

№ п/п	Фактори виробничого середовища й трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	3 клас: шкідливі й небезпечні умови й характер праці			Тривалість дії фактора за зміну, %
				1 ступінь	2 ступінь	3 ступінь	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг\м^3: 1 клас небезпеки Ангідрид хромовий Марганцю оксид	 0,01 0,05	 0,025 0,03			2,5р	90
	2 клас небезпеки Сірководень	 10	 9				90
	3 клас небезпеки Азоту діоксид Вуглецю оксид	 2,0 20,0	 2,2 25,0				90
2	Пил переважно фіброгенної дії, мг\м^3	4	25			6,25р	90
3	Шум, дБА	80	83			3	90
4	Вібрація (локальна), дБ	92	96		4		90
5	Мікроклімат у приміщенні (теплий період): - температура, ^{0}С; - швидкість руху повітря, м/с; - відносна вологість повітря, %; -інфрачервоне випромінювання, Вт/м^2	 15…26 0,2-0,6 40..60 140	 22 0,4 40 2650	 0,01 	 2510	 	90
6	Кількість факторів				2	3	

5.3 Порядок проведення контролю параметрів мікроклімату

Незалежно від стану природних метеорологічних умов на робочих місцях лабораторії повинні бути створені кліматичні умови, безпечні для працівників лабораторії та найбільш сприятливі для виконання роботи. Під мікрокліматом робочих приміщень розуміється метеорологічні умови внутрішнього середовища приміщень, які визначаються діючими на організм людини сполученнями температури, вологості, швидкості руху повітря і теплового випромінювання. Показники мікроклімату повинні забезпечувати збереження теплового балансу людини з навколишнім середовищем та підтримку оптимального або допустимого теплового стану організму.

Нормалізація параметрів мікроклімату здійснюється за допомогою комплексу заходів та засобів колективного захисту, які включають будівельнопланувальні, організаційно-технологічні, санітарно-гігієнічні та медикобіологічні. Для профілактики перегрівань та переохолоджень робітників використовуються засоби індивідуального захисту. Так, будівельнопланувальні та організаційно-технологічні включають заходи та засоби, які пов’язані з: раціональним плануванням приміщень, оптимальним розміщенням устаткування, механізацією та автоматизацією виробництва, використанням теплозахисних екранів. До комплексу санітарно-гігієнічних заходів та засобів нормалізації параметрів мікроклімату відносять вентиляцію, опалення та кондиціонування повітря.

Медико-біологічні заходи та засоби нормалізації параметрів мікрокліматy включають: режим праці та відпочинку, медичні огляди працівників, профілактика водно-сольового балансу.

Важливе значення для профілактики перегрівання мають індивідуальні засоби захисту. Для захисту голови від теплового опромінення застосовують дюралеві, фіброві каски; очей – окуляри; обличчя – маски з відкидним прозорим екраном. Захист від дії зниженої температури досягається

використанням теплого спецодягу, а під час опалів – плащів та гумових чобіт [16].

5.4 Правила техногенної безпеки в лабораторії

В лабораторних умовах слід дотримуватися ряду правил техногенної безпеки [17] (рис. 5.1-5.3) для уникнення нещасних випадків. Важливо знати, як правильно поводитися з обладнанням, хімічними речовинами та у разі виникнення надзвичайних ситуацій.



Рисунок 5.1 – Правила техногенної безпеки [18]



Рисунок 5.2 – Пожежна безпека [19]

Алгоритм перших дій у надзвичайних ситуаціях наступний:

1. Огляньте місце події та переконайтеся, що немає безпосередньої загрози вашому життю і здоров'ю, а потім можете допомагати постраждалим.

2. Огляньте постраждалих та зрозумійте, чи є потреба у наданні екстреної медичної допомоги, чи є загроза їх життю.

3. Покличте рятувальників (101) і медиків (103).

4. Залишайтеся з постраждалим до приїзду екстрених служб, намагаючись зберегти або поліпшити його стан доступними методами.

5. Не приступайте до дій відразу. Визначте, яка допомога (крім психологічної) потрібна, хто з усіх найбільшою мірою потребує допомоги.



Рисунок 5.3 – Правіла поведінки при виявленні вибухонебезпечних предметів [20]

5.5 Висновки

1. Аналіз шкідливих факторів виробничого середовища лабораторії показав, що робоче місце сталевара в лабораторних умовах біля ДСП-3,2 є досить важкими: II клас – 2 фактори, III клас – 3 фактори.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу сьогоденних способів легування сталі ванадієм показано доцільність легування сталі окускованими сумішами в ковші із застосуванням матеріалів, що містять пентоксид ванадію (ванадієвий шлак).

2. Спираючись на те, що в якості основних відновників ванадію в промисловості використовують вуглець, кремній, алюміній та кальцій запропоновано використовувати в якості відновника кремній і вуглець.

3. При дослідженні процесу брикетування сумішей для легування сталі ванадієм і азотом показано можливість використання чотирьох варіантів приготування цих сумішей:

– ванадійвмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію і вуглецю;

– ванадійазотовмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію, а азотовмісної речовини – натрієвої селітри;

– ванадійазотовмісна суміш з використанням у якості відновника кремнію і вуглецю, а азотовмісної речовини натрієвої селітри і ціанаміду кальцію;

– ванадійазотовмісна суміш з використанням у якості відновника вуглецю, кремнію і кальцію, а азотовмісної речовини – натрієвої селітри і ціанаміду кальцію.

4. Встановлено, що підвищення витрати речовини, що пов'язує, - сульфіт-спиртової барди з 10 до 12% та питомого тиску пресування (з 300 до 400 кг/см^2) при сушці при 120 ^{0}С приводить до зміцнення брикетів в 1,4 рази. Показано, що із збільшенням температури нагріву в'язкість сульфіт-спиртової барди знижується, особливо при нагріві розчину до температури 60-90 ^{0}С.

5. Дослідним шляхом встановлено, що найміцнішими окатишами є зразки, отримані з ванадійвмісної суміші з застосуванням у якості відновника кремнію і вуглецю. Максимальна міцність брикетів при зберіганні на повітрі в критому приміщенні досягається через десять діб.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Технології виготовлення деталей складної форми. Частина 1: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньо-професійної програми «Технології машинобудування» та освітньо-наукової програми «Технології машинобудування» / Петраков Ю. В., Сохань С. В., Фролов В. К., Кореньков В. М. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 288 с.

2. Розробка раціональної технології мікролегування та модифікування спокійних марок сталі порошкоподібними матеріалами / Нізяєв К. Г, Хотюн В. І., Стоянов О. М. , Синегін Є. В. *Метал та лиття України.* 2022. Том 30. № 1. С. 35–41.

3. Леговані сталі : що це таке і в чому їхня перевага? URL: https://ssc.org.ua/ua/statti/legovani-stali-shho-cze-take-i-v-chomu-yihnya-perevaga (дата звернення: 19.04.2025)

4. Куцова В. З., Ковзель М. А., Носко О. А. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями : підручник. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2008. 348 с.

5. Шиліна О. П. Вплив легування ванадієм на структуру та зміну властивостей наплавлених шарів конструкційних сталей. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. № 2. С. 127–131.

6. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник / Д.Ф. Чернега, В.С. Богушевський, Ю.Я. Готвянський та ін. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.

7. Дослідження впливу мікролегування на властивості сталі. URL: https://dspace.khadi.kharkov.ua/items/f0324367-1b77-4243-bab0-1a2e517a4dce (дата звернення: 19.04.2025)

8. Гаврилюк К. О., Воденнікова О. С. Дослідження мікролегування сталі багатокомпонентною сумішшю на основі ванадію. *Збірник наукових праць магістрантів кафедри МЧМ.* Випуск 11. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. С. 36-41.

9. Гаврилюк К. О., Середа Б. П. Аналіз внутрішньо агрегатної обробки

металу в аргоні у двованному сталеплавильному агрегаті. Метали XX науково-технічна конференція студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА. Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості. Т І. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. С. 4.

10. Віскозиметр. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%96%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B7%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80 (дата звернення: 19.04.2025)

11. Дугова сталеплавильна піч змінного струму ДСП-3. URL: https://termolitmash.ub.ua/goods/view/23092965/all/dugova-staleplavilna-pich-zminnogo-strumu-dsp-3/ (дата звернення: 19.04.2025)

12. Дугова сталеплавильна піч змінного струму ДСП 1,5. URL:https://ub.ua/market/view/15405911/all/dugovaya-staleplavilnaya-pech-peremennogo-toka-dsp-1-5-kupit/ (дата звернення: 19.04.2025)

13. Грибан В. Г., Казначеєв Д. Г., Бойко О. І. Безпека життєдіяльності та охорона праці у схемах : навч. посіб. Дніпро : ДДУВС, 2019. 228 с.

14. Пістун І. П., Катренко Л. А., Кіт Ю. В. Охорона праці : навч. посіб. з практикумом. Київ : Унівеситетська книга, 2020. 540 с.

15. Охорона праці та цивільний захист : підручник / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний та ін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 420 с.

16. Порядок проведення контролю параметрів мікроклімату. URL: https://www.dls.gov.ua/for_subject/%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%BE%D0%BA-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%8E-%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D1%82/ (дата звернення: 19.04.2025)

17. Про затвердження Правил техногенної безпеки. URL:

https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1346-18#Text (дата звернення: 19.04.2025)

18. Правила пожежної та техногенної безпеки під час проведення масових засобів. URL: https://mk.dsns.gov.ua/photo/8880-1 (дата звернення: 19.04.2025)

19. Інформаційний стенд пожежна безпека. URL: https://shop.brt.com.ua/stend-pozharnaya-bezopasnost.html (дата звернення: 19.04.2025)

20. Стенд «Правіла поведінки при виявленні вибухонебезпечних предметів». URL: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/shopping?q=tbn:ANd9GcSJh0ze3zbu6D-GnGfpfiyyC6vcOZPpq2279cA4oYLcOR1mTOuz9BdoUrJ9DUQmzkoV4Oku7YvCQxNxePZ9L4ZMqt9RoADP5LxcwrO8GOy2 (дата звернення: 19.04.2025)