

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Металургія

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему Розробка технології виплавки високоемісним
сплавом з допомогою процесів плазмено-дугового
відновлення

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1369-МЧМ-3
 спеціальності 136 МЕТАЛУРГІЯ
 (код і назва спеціальності)

спеціалізації _____

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми металургія чорних металів
 (назва освітньої програми)

Ю.О. Іванов

(ініціали та прізвище)

Керівник доцент, Н.Тед.и. доц. Мосейко Ю.В.
 (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доцент, Н.Т.и. доц. Волер Р.М.
 (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут _____
Кафедра металургія
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 136 металургія
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма металургія гарячих металів

ЗАТВЕРДЖУЮ [Підпис]
Завідувач кафедри Кирилюк О.Г.
« 02 » вересня 2020 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Званову Юрію Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Розробка технології виготовлення високоенергетичної сталі за допомогою процесів плазмено-дугового відновлення

керівник роботи Мосейко Юрій Вікторович ч. пер. н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «09» жовтня 2020 року № 1586-с

2 Строк подання студентом роботи 24 листопада 2020 р.

3 Вихідні дані до роботи патенти, література, інструкції, періодичні видання, інтернет ресурси, відеофайли

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) плазмено-дуговий переплав, використання слабу сталею, центри плазмотрону, плазмоутворення газу

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень схема баластоселективного металургійного плазмотрона, схема плазмової печі з нерівномірною структурою, плазмотрон ПТЛ-25 м, принцип роботи сталевих плазмотронів

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Вступ	Мосейно Ю.В. доцент	02.09.20	02.09.20
Загальна частина	Мосейно Ю.В. доцент	17.09.20	17.09.20
Конструктивні пелі	Мосейно Ю.В. доцент	03.10.20	03.10.20
Дослідча частина	Мосейно Ю.В. доцент	20.10.20	20.10.20
Висновки	Мосейно Ю.В. доцент	04.11.20	04.11.20

7 Дата видачі завдання 02 вересня 2020р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	02.09 - 16.09.20	
2.	Загальна частина	17.09 - 02.10.20	
3.	Конструктивні основи лішого деталізація	03.10 - 19.10.20	
4.	Дослідча частина	20.10 - 03.11.20	
5.	Висновки	04.11 - 20.11.20	

Студент _____

(підпис)

Гонимов Ю.О.

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____

(підпис)

Мосейно Ю.В.

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____

(підпис)

Валер Р.М.

(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Іванов Ю.О. Розробка технології виплавки високоякісних сталей за допомогою процесів плазмено-дугового відновлення.

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістр зі спеціальності 136 «Металургія», освітня програма «Металургія чорних металів», науковий керівник Ю.В. Мосейко, Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут, кафедра металургії, 2020.

Розглянуто способи виробництва конструкційних сталей, проведено аналіз існуючих методів виплавки високоякісних сталей, фізико-хімічні основи виплавки конструкційної високоякісної сталі, конструкція основного пічного устаткування. Проаналізовано вплив розташування плазмотрона на кінцевий вміст азоту у металі.

Ключові слова: СТАЛЬ, ПЛАЗМОТРОН, ВІДНОВЛЕННЯ,

ПЛАЗМЕНО-ДУГОВИЙ ПЕРЕПЛАВ, АЗОТ.

ABSTRACTS

Ivanov Yu.O. Development of technology for smelting high-quality steels using plasma-arc reduction processes.

Qualifying work for the degree of higher education master's degree in specialty 136 "Metallurgy", educational program "Metallurgy of ferrous metals", supervisor Yu.V. Moseiko, Zaporizhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute, Department of Metallurgy, 2020.

Methods of production of structural steels, review of existing methods of smelting of high-quality steels, physical and chemical bases of smelting of structural high-quality steel, design of the main furnace equipment are considered.

The influence of the plasmatron location on the final nitrogen content in the metal is analyzed.

Key words: STEEL, PLASMOTRON, RESTORATION, CASTING,
PLASMA-ARC MELTING, NITROGEN.

АННОТАЦИЯ

Иванов Ю.А. Разработка технологии выплавки высококачественных сталей с помощью процессов плазменно-дугового восстановления.

Квалификационная работа на соискание степени высшего образования магистр по специальности 136 «Металлургия», образовательная программа «Металлургия черных металлов», научный руководитель Ю.В. Мосейко, Запорожский национальный университет, Инженерный учебно-научный институт, кафедра металлургии, 2020.

Рассмотрены способы производства конструкционных сталей, проведен анализ существующих методов выплавки высококачественных сталей, физико-химические основы выплавки конструкционной высококачественной стали, конструкция основного печного оборудования. Проанализировано влияние расположения плазмотрона на конечное содержание азота в металле.

Ключевые слова: СТАЛЬ, ПЛАЗМОТРОН, ВОССТАНОВЛЕНИЕ,
ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ ПЕРЕПЛАВ, АЗОТ.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 65 с., 5 табл., 12 рис., 28 джерела.

СТАЛЬ, ПЛАЗМОТРОН, ВІДНОВЛЕННЯ, ПЛАЗМЕНО-ДУГОВИЙ ПЕРЕПЛАВ, АЗОТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: «Розробка технології виплавки високоякісних сталей за допомогою процесів плазмено-дугового відновлення».

У розділі «Загальна частина» розглянуто існуючі способи виробництва конструкційної сталі; фізико-хімічні основи виплавки конструкційної високоякісної сталі; загальна характеристика плазмово-дугового нагріву.

В другому розділі описано плавильні плазмові печі з керамічним тиглем, гази, які застосовують при плазмових процесах та устрій плазмотрону .

В «Дослідній частині» проаналізовано методики азотування сталі, визначено оптимальні умови для отримання якісних сталей з урахуванням розташування плазмотрону.

ЗМІСТ

Вступ	8
1. Загальна частина	10
1.1 Сучасні тенденції розвитку галузі	10
1.2 Корозійно-стійкі сталі	11
1.2.1 Ферито-перлітні марки сталі	11
1.2.2 Аустенітно-мартенситні і аустенітні марки сталі	13
1.3 Азот – легуючий елемент	15
1.4 Огляд існуючих способів виробництва конструкційної сталі	18
1.4.1 Метод плавки сталі з повним окисленням	18
1.4.2 Метод плавки сталі переплавом відходів	19
1.5 Фізико-хімічні основи виплавки конструкційної високоякісної сталі	20
1.6 Загальна характеристика плазмово-дугового нагріву	23
1.7 Ресурс роботи плазмотронів	26
2. Конструкція основного пічного устаткування	38
2.1 Плавильні плазмові печі з керамічним тиглем	38
2.2 Плазмотрон для плавки металів	42
2.3 Плазмоутворюючі гази	44
3. Дослідна частина	47
3.1 Дослідження методики по азотуванню сталі	47
3.1.1 Установа ПДП №1 з горизонтальним розташуванням плазмотрона	48
3.1.2 Установа ПДП №2 з вертикальним розташуванням плазмотрона	50
3.1.3 Методика введення азоту на ПДП №1	51
3.1.4 Методика введення азоту на ПДП №2	53
3.2 Основні споживачі та шляхи вдосконалення технології	60
Висновки	62
Перелік джерел посилання	63

ВСТУП

Актуальність проблеми. Розвиток промисловості і постійно зростаючі вимоги споживачів металу до якості металевих виробів і конструкцій стимулює збільшення частки легованих сталей в загальному обсязі металургійного виробництва. Нові матеріали повинні перевершувати існуючі по механічним, корозійним властивостям, при одночасному оптимальному співвідношенні ціни і якості готового виробу.

Особливу увагу необхідно приділяти сплавам, що застосовуються в атомній, нафтовій і газовій промисловості (труби з особливим комплексом властивостей), а також для виготовлення деталей з особливими властивостями, які використовуються в багатьох вимірювальних приладах для різних галузей, починаючи від датчиків кута повороту бурової головки при дослідженні земних надр до комплектуючих оптичних систем космічних супутників.

Для підвищення чистоти металів і поліпшення їх фізико-хімічних властивостей металурги використовують різні види впливу на метал. Ці види впливу можна умовно розділити на чотири групи:

1) застосування шлаків або газів в якості рафінуючих реагентів для проведення реакцій дефосфорації і десульфурації, екстрактивного видалення з металу розчинених газів і неметалевих включень;

2) підвищення температури металів, яке призводить до інтенсифікації процесів розкислення їх розчиненим вуглецем, спливання неметалевих включень;

3) вакуумування металу, значно підвищує розкислювальну здатність вуглецю та знижуючий вплив розчинених газів та легкоплавких домішок кольорових металів, а також неметалевих включень в результаті їх флотації при барботуванні металу;

4) примусова кристалізація у водоохолоджувальних кристалізаторах, що дає можливість, регулюючи швидкість кристалізації, отримувати бажану

макроструктуру, збільшувати густину металу, отримувати злитки без зональної ліквідації, газових пухирців та практично без усадочних раковин [1].

Всім цим вимогам задовольняють метали і сплави, які виплавляються в сучасних спеціальних плавильних агрегатах, до яких відносяться всі печі переплавних процесів: індукційні печі, вакуумно-дугові (ВДП), електрошлакові (ЕШП), електронно-променеві (ЕПП), плазмено-дугові (ПДП) і гарнісажні (ГРЕ).

Розмаїття чинників (високотемпературний перегрів, капельний перенос, спрямована кристалізація) і рафінуючих середовищ (шлаки, флюси), вакуум, інертне середовище забезпечують глибоке, повне рафінування металу від більшості домішок (гази, кольорові метали, шкідливі домішки типу сірки, неметалеві включення) і високу якість одержуваного металу.

Разом з тим переплави забезпечують умови, близькі до зональної перекристалізації і отримання нової структури, пригнічують ліквідаційні процеси і сприяють отриманню однорідного складу металу, близького до вихідного на початку і кінці переплавки, незалежно від коефіцієнта розподілу легуючих елементів [2].

Мета роботи – дослідження і розробка технології виплавки високоякісних сталей за допомогою плазмово-дугового відновлення.

Завдання роботи – аналіз фізико-хімічних особливостей взаємодії азоту з металом при переплавці заготовок в плазменно-дуговим переплавом.

Об'єкт дослідження – технологія азотування сталі при виплавці методом ПДП.

Предмет дослідження – закономірність процесу азотування сталі та його вплив на якість готової продукції, властивості.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Сучасні тенденції розвитку галузі

Світове виробництво сталі в 2012 році зросло до нового рекордного рівня і, згідно з даними World Steel Association (WSA), склало 1548 млн. т, що на 1,2% перевищило результат 2011 року. Зростання виробництва сталі і досягнення рекордного обсягу випуску в основному відбулося за рахунок розвинених країн. Останнім часом спостерігається тенденція зростання вітчизняної чорної металургії, її модернізації і відповідності світовому рівню. До успіхів металургійного комплексу, зокрема, відноситься десяте місце в світі за обсягами виплавки сталі (таблиця 1).

Таблиця 1 - Десятка найбільших країн-виробників сталі

Місце	Країна	2012 р. млн. т	Зміни в % до 2011 р.	Виробництво на душу населення, т	Доля у світовому виробництві, %
1	Китай	708,78	3,7%	0,52	45,79
2	Японія	107,23	-0,3	0,85	6,93
3	США	88,60	0,28	2,7	5,72
4	Індія	76,72	6,3	0,06	4,96
5	Росія	70,61	2,7	0,49	4,56
6	Південна Корея	69,32	1,2	1,49	4,48
7	Германія	42,66	-3,7	0,52	2,76
8	Турція	35,88	5,2	0,48	2,32
9	Бразилія	34,68	-1,4	0,17	2,24
10	Україна	32,91	- 6,9	0,73	2,13

Загальні тенденції світового розвитку в області виробництва спецсталей показують, що в даний час інтенсивно ведуться розробки і дослідження в області ливарних і деформівних сплавів і сталей із

спеціальними властивостями, сировини, вихідних компонентів для їх виробництва і технологій їх переробки в високотехнологічну наукоємну продукцію з великою часткою інноваційної складової. Причому основні напрямки розвитку спецелектрометалургії за кордоном полягають в:

- удосконаленні технології виплавки і переплаву спецметалу, агрегатів, систем контролю і управління процесами, для забезпечення гарантії якості металу, збільшення виходу придатного і зниження витрат;
- створення нових менш витратних технологій для виробництва спецметалу «наземного» (чи не авіакосмічної промисловості) застосування, для істотного зниження собівартості металу.

В даний час все більше уваги приділяється отриманню спеціальних сталей і сплавів методом порошкової металургії. Перспективи розвитку порошкової металургії насамперед пов'язують зі створенням нових, легких, міцних композиційних матеріалів і наноструктурних покриттів. Створення тврдосплавних матеріалів з наноструктурою дозволить поліпшити ріжучі властивості і фізико-механічні характеристики матеріалу не менш ніж в 2-3 рази, а нанесення покриттів з використанням нанопорошків, дозволяє збільшити строк служби виробів в 5-6 раз [3].

1.2 Корозійностійкі сталі

1.2.1 Ферито-перлітні марки сталі

Відомо, що в міру збільшення вмісту легуючих елементів стійкість аустеніту в інтервалі температур перлітного перетворення зростає, а температурна область мартенситного перетворення знижується. Це схематично відображено на діаграмі розпаду аустеніту (рисунок 1) [4].

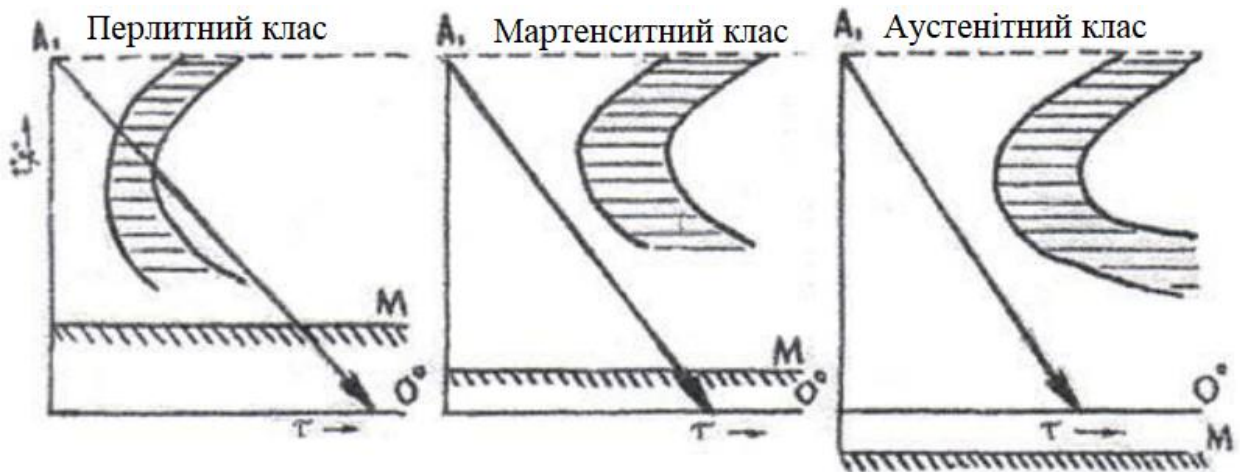


Рисунок 1 - Діаграма ізотермічного розпаду аустеніту
для сталей трьох класів

Залежно від вмісту легуючих елементів при заданій швидкості охолодження (на повітрі) можна отримати різну структуру. Дослідження взаємодії азоту з різними класами сталей розпочаті І.П. Чижевським і І.І. Жуковим, але питання про можливість використання азоту в якості легуючого компонента стало актуальним лише після 30-х років.

Питання про вплив азоту на властивості ферито-перлітних сталей досить повно розкриті в літературних джерелах [4, 5], після аналізу яких можна виділити основні цілі його введення:

- зміцнення феритної матриці за рахунок розчинення максимального числа атомів впровадження та заміщення при збереженні низької схильності до крихкого руйнування і хорошою зварюваністю;
- отримання дрібнозернистої структури шляхом легування твердого розчину елементами, що зменшують схильність зростання аустенітного зерна при високих температурах;
- зниження дифузійної рухливості азоту і вуглецю для забезпечення мінімальної схильності сталі до знеміцнення в процесі експлуатації.

Можна виділити основні фактори, що впливають на коефіцієнт дифузії азоту в фериті [5]:

— кількість і вид атомів заміщення в решітці заліза, радіус і заряд іонів, різниця між діаметрами атомів розчинника і легуючого елемента;

— сили локальних зв'язків Fe – M, M – N(C), Fe – N(C), виходячи з величини вільної енергії утворення окремих інтерметалідних утворень, карбідів і нітридів найбільші зміни викликають W, Mo, Ti, Nb, Si, тому що вони мають в 1,5 - 5 разів вищу спорідненість до азоту порівняно з вуглецем.

На підставі проведених досліджень з аналізу поведінки азоту в сталях феритно-перлітного класу за методом внутрішнього тертя [27,33] можна зробити наступні висновки:

- присутність нітридоутворюючих легуючих елементів знижує рухливість азоту, що знижує ймовірність утворення твердого розчину впровадження (при введенні азоту), тобто призводить до його знеміцнення;

- відзначено, що ванадій, незважаючи на те, що є сильним нітридоутворюючим елементом, при низьких концентраціях впливає сприятливо на рухливість азоту (концентрація ванадію на рівні 0,1% забезпечує достатню розчинність азоту в фериті, близьку до його розчинності в системі Fe - . При більш високих концентраціях ванадію ($\approx 1\%$) азот присутній в розчині як стабільний нітрид;

- легуючі елементи заміщення зменшують максимальну розчинність азоту в фериті, однак ферит може розчинити більше азоту, ніж вуглецю. Відзначено, що азот, як елемент впровадження, не тільки підвищує міцність, але і зменшує пластичність фериту. Вплив азоту на властивості феритних сталей здійснюється в основному в результаті формування надлишкових фаз нітриду і карбонітридів.

1.2.2 Аустенітно-мартенситні і аустенітні марки сталі

Вплив азоту на властивості сталі аустенітного і аустенітно-мартенситного класу також були оцінені в рядах робіт [6, 7]. Відомо, що

основною метою введення азоту в якості легуючого компонента для даних класів сталі є відмова (мінімізація) від легування нікелем, як аустенітоутворюючим елементом, для зниження собівартості готових виробів і отримання економно-легованих сталей з високими властивостями.

Вважається, що азотистий аустеніт може бути описаний як розбавлений розчин на основі хімічної сполуки, що дає підставу вважати термічну стабільність азотистого аустеніту вищою за порівняно з вуглецевим.

Велика стабілізація азотистого аустеніту, труднощі виділень в ньому фаз — одні з важливих завдань азоту, як аустенітоутворюючого елемента.

Специфічні можливості азоту надавати сприятливий вплив на аустенітну структуру обумовлені істотними відмінностями електронної структури азотистого і вуглецевого аустеніту, виявлені методами внутрішнього тертя і іншими фізичними прийомами.

З аналізу літературних даних [4, 5] можна зробити висновок, що характер зв'язку в карбідних і нітридних фазах визначається як іоноковалентна, маючи на увазі, що електронегативність вуглецю і азоту значно вище електронегативності перехідних елементів.

Перераховані відмінності пов'язані з різною структурою вуглецевого і азотистого аустеніту. Відрізняється і їх електронна будова. Атоми вуглецю і азоту є донорами електронів. У азотистому аустеніте перенесення електронів від атома азоту до заліза йде інтенсивніше, ніж обмін електронами між атомами вуглецю і заліза в вуглецевому аустеніті, що свідчить про посилення міжатомного зв'язку. Просторовий розподіл заряду в решітці азотистого аустеніту більш симетрично, тобто при меншому розмірі іонів азоту це сприяє більшій розчинності азоту в аустеніті в порівнянні з вуглецем.

Згідно з дослідженнями широкого спектру аустенітно-мартенситних і аустенітних сталей з концентрацією азоту від 0,2 до 1,7%, хрому від 2 до 20%, марганцю від 2 до 21%, нікелю від 2 до 28% і їх вуглецевих аналогів [12,15,24,25, 29] можна виділити особливості поведінки азоту:

- холодна пластична деформація азотистих сталей веде до підвищення енергії активації дифузії азоту і до лінійного росту висот максимуму ступеня деформації;

- введення азоту дозволяє зменшити активність вуглецю, тобто одночасно підвищити механічні та корозійні властивості готового матеріалу [7];

- сталі, леговані азотом, характеризуються дуже вузьким деформаційним інтервалом аустенітно-мартенситного перетворення (10—30%) в порівнянні з вуглецевих (0—55%) [8].

Виходячи з вищесказаного можна зробити висновок, що легування азотом веде до створення аустеніту з високою концентрацією дефектів упаковки, що дозволяє створити ряд азотистих сталей аустенітного класу з високими механічними характеристиками.

1.3 Азот - легуючий елемент

Дослідження впливу азоту на властивості готового матеріалу проводились ще з 30-х років. Їх результати показали, що азот благотворно впливає на структуру і властивості сталей різних класів: аустенітної і аустеніто - феритної, аустенітно-мартенситної, феритної сталі, — стабілізує аустеніт, підвищує механічні характеристики сталі: підвищує твердість, межі плинності і міцності, при збереженні (підвищенні) пластичних властивостей, що послужило поштовхом для вивчення методик введення азоту з метою розробки універсальних технологічних прийомів отримання азотованих матеріалів.

Ймовірно, саме такий унікальний вплив добавки азоту як легуючого компонента на характеристики різних класів сталей до сих пір підігріває інтерес до даної теми.

Умовно сталі, леговані азотом, можна розділити на дві основні категорії:

- сталі з вмістом азоту нижче (на рівні) рівноважного;
- стали з вмістом азоту вище рівноважного («надрівноважні»).

Перші отримують в умовах виплавки і кристалізації при атмосферному тиску азоту. Другі - при контрольованій зміні основних параметрів експерименту (підвищеному тиску азоту і високих температурах процесу азотування), що дозволяють зберегти більший його вміст в металі, ніж при відкритій виплавці.

Легування азотом корозійностійких марок сталі, як показано в роботах [9, 10] знижує в них вміст нікелю і марганцю в півтора - два рази, а в деяких випадках взагалі виключити ці елементи, що дозволяє використовувати дані марки в якості медичних (нікель — один з сильних алергенів), а також підвищити їх експлуатаційні властивості при зниженні собівартості готового виробу.

Крім того, відомо, що корозійностійкі марки сталі, леговані азотом, перевершують по міцності, в'язкості і корозійної стійкості традиційні сталі даного класу.

Опис впливу азоту на властивості сталі наводяться в багатьох публікаціях, в результаті аналізу яких можна виділити наступні особливості його впливу на властивості сталей різних класів:

- утворює тверді розчини впровадження в аустеніті і фериті, що призводить до зміцнення матеріалу;
- знижує енергію дефектів упаковки, що дозволяє підвищувати пластичні властивості сталі поряд зі збільшенням міцності;
- розширює і стабілізує область існування аустеніту і звужує область існування дельта-фериту, який охрупчує сталь. Крім того, ця властивість дозволяє зменшити (або повністю відмовитися від використання) кількість дорогих легуючих елементів, стабілізуючих аустеніт;
- дозволяє підвищити кількість легуючих елементів, стабілізуючих ферит, які позитивно впливають як на механічні властивості, так і на корозійну стійкість сталей;

— в твердому розчині збільшується стійкість сталі проти загальної, піттингової, щілинної і міжкристалітної корозії. Це обумовлено, в зокрема, тим, що при утворенні нітридів (наприклад, Cr_2N) зв'язується менша кількість хрому, ніж в разі утворення карбідів (наприклад, Cr_{23}C_6), тобто зниження збіднення хромом основного матеріалу;

— легування сталей азотом збільшує концентрацію електронів провідності, тобто підсилює металевий характер міжатомної взаємодії і, тим самим, це пояснює підвищення в них ударної в'язкості і в'язкості руйнування;

— дозволяє сповільнити або запобігти утворенню вторинних приграничних фаз (карбідів і σ -фази), стабілізувати перетворення ферит \rightarrow аустеніт і аустеніт \rightarrow мартенсит, що забезпечує їм високу стійкість до міжкристалітної корозії.

Введення азоту в сталь дозволяє вирішувати не тільки питання підвищення їх міцності, корозійної стійкості та економії легуючих елементів, а й сприяє вирішенню проблем, пов'язаних з «екологією» процесу виплавки матеріалів. Наприклад, при повній (частковій) відмові від легування сталей марганцем (заміні його азотом) можна уникнути шкоди екосистемі і здоров'ю людей, пов'язаних з викидами в атмосферу токсичних окислів марганцю при виплавці. Крім того, азот, що входить до складу повітря, є дешевим, і процес його отримання з атмосфери не вимагає руйнування поверхні і надр землі, неминучих при видобутку руд.

Однак, незважаючи на всі позитивні властивості азоту, як легуючого елемента, його введення має ряд недоліків і труднощів, що заважає розвитку напрямку азотованих матеріалів зі створенням стійкого промислового сектора. Іноді в сталі, легованої азотом, з огляду на його малу розчинність (при нормальних умовах) і досить високу рухливість, спостерігаються газові раковини при кристалізації металу. Для виключення утворення дефектів від введення азоту необхідний аналіз поведінки азоту в різних металургійних процесах, розробка режимів азотування і уточнення існуючих з метою використання даного елемента для створення високоякісних матеріалів.

Утримання азоту в твердому розчині можна досягти за рахунок легування елементами, що володіють більшою енергією зв'язку з ним, ніж з залізом.

Таким чином, присутність азоту в твердому розчині дозволяє підвищити міцність металу. Крім того, наявність твердої дисперсної нітридної фази сприяє подрібненню зерна і дисперсному зміцненню металу, що призводить до підвищення механічних властивостей сталі. Однак в процесі легування сталі азотом необхідно оцінити поведінки азоту на різних стадіях сталеплавильного процесу, оперуючи надійними даними по розчинності, швидкості розчинення і умов взаємодії азоту з іншими компонентами розплаву для зниження ризику утворення дефектів при введенні азоту в метал.

1.4 Огляд існуючих способів виробництва конструкційної сталі

1.4.1 Метод плавки сталі з повним окисленням

При веденні плавки з окисленням шихта складається з відходів вуглецевої сталі. Для збільшення вмісту вуглецю в шихті додають кокс або електродний бій (іноді чавун) з таким розрахунком, щоб протягом окисного періоду вигоріло 0,3—0,4% С [11].

Для забезпечення умов раннього шлакоутворення в шихту додають вапно в кількості 1-2% від ваги садки, а протягом плавлення додають у ванну два-три рази вапно, плавиковий шпат, боксит або шамот.

Сучасна технологія виплавки передбачає часткове поєднання періодів окислення і плавлення, для чого за 20-30 хв. до повного розплавлення у ванну додають залізну руду в кількості 1-2% від садки агрегату.

Після добавки всіх шлакоутворюючих, ще до повного розплавлення шихти, повинен бути наведений рідкорухливий окислювальний шлак, що забезпечує проведення енергійного кипіння ванни з окисленням невеликої кількості вуглецю. В останні роки з метою скорочення тривалості плавки і

економії електроенергії проводять під час плавлення і окисного періоду продувку ванни киснем.

Концентрація марганцю у ванні під час окисного періоду не регламентується. Однак деякі металурги вважають що при високому його вмісті у вихідній шихті кремнезем інтенсивніше офлюсовується закисом марганцю [12].

У практиці вітчизняних заводів окислювальний період закінчується при вмісті вуглецю у ванні 0,75—0,85%. Температура металу до цього моменту повинна бути трохи вище, ніж перед випуском і складати 1570-1590° С.

1.4.2 Метод плавки сталі переплавом відходів

При виплавці сталі методом переплаву в шихту вводять близько 80-90% відходів конструкційної сталі. По розплавленні у ванні міститься не менше 0,85% С і не більше 0,020% Р. З цієї причини, як правило, елементи не потрібно окислювати. Після повного розплавлення і підігріву ванни шлак скачують. Відновлювальний період проводять так само, як і на плавках з окисленням.

Цей метод дозволяє скоротити тривалість плавки, зменшити витрату електроенергії і більш повно використовувати легуючі елементи, що містяться у відходах. Однак при переплаві майже відсутній процес кипіння, який є найбільш ефективним засобом очищення ванни від газів і неметалевих включень.

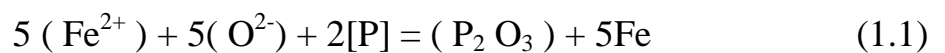
У зв'язку з цим на заводах була проведена порівняльна оцінка забрудненості сталі, виплавленої як з повним окисленням, так і методом переплаву [13]. На підставі проведеного дослідження було встановлено, що сталь, виплавлена з окисленням, менш забруднена оксидними включеннями і містить більше сульфідних включень, ніж сталь, отримана методом переплаву.

Для поліпшення якості сталі, виготовленої методом переплаву, вважають за необхідне застосовувати часткове окислення.

1.5 Фізико-хімічні основи виплавки конструкційної високоякісної сталі

Фосфор є шкідливою домішкою в сталі оскільки, перебуваючи в ній він надає їй крихкість і сильно підвищує схильність до крихкого зламу. Фосфор також підвищує поріг холодноламкості, тобто температуру різкого падіння ударної в'язкості. Тому максимально-допустимий вміст фосфору в сталі спеціального призначення обмежують нижньою межею, який становить до 0,030%.

Вміст фосфору в шихті при виплавці сталі складає близько 0,03%. Видаленню фосфору сприяють висока лужність, висока окисленість шлаку і низька температура. Процес видалення фосфору з металу в шлак виражається рівнянням:



В окислювальний період плавки сталі в дуговій печі реакція окислення фосфору, досягає рівноваги і зміни складу шлаку викликає зміну в реакції. Із збільшенням кількості шлаку збільшується кількість фосфору, який перейшов в шлак та знижується його вміст у металі. Підвищення основності шлаку (підвищення концентрації CaO), а також підвищення вмісту FeO в шлаку сприяють дефосфорації.

На ступінь дефосфорації сталі значний вплив має температура ванни. З підвищенням температури коефіцієнт розподілу фосфору між шлаком збільшується, тобто ступінь дефосфорації металу зменшується. Температурний режим плавки теж має значення в процесі дефосфорації [14].

Десульфуріяція сталі - сірка володіє необмеженою розчинністю в рідкому стані і дуже малою розчинністю в твердому стані.

Внаслідок зниження розчинності під час кристалізації сталі та її охолодження, сірка виділяється з розчину у вигляді включень сульфідів FeS * FeO . Виділення включень в кінці затвердіння, призводить до того, що вони розташовуються по границях зерен, послаблюючи їх зв'язок і погіршуючи властивості металу. При температурі гарячої обробки металу тиском сірка викликає зниження технологічної пластичності сталі, так звану червоноламкість.

Зниження вмісту сірки в металі в процесі плавки відбувається внаслідок переходу її в шлак. Цей перехід описується рівнянням:



Відомо, що сірка розчиняється в кислих шлаках і добре – в основних. При постійній основності межа розчинності сульфиду кальцію, з ростом температури збільшується. Десульфурація сталі в процесі плавки відбувається головним чином в результаті розподілу між металом і шлаком і зв'язування окисом кальцію в шлаці. Знижений вміст CaO в шлаці сприяє більш повному видаленню сірки з металу. Дісульфурації сприяє підвищення основності шлаку. У відновлювальний період при плавці під високоосновним шлаком з низьким вмістом FeO можна отримати сталь з необхідним вмістом сірки. Подальшу десульфурацію сталі можна здійснити, обробляючи її в ковші під час випуску плавки при створенні великої поверхні контакту металу і шлаку з гарними десульфуруючими властивостями.

Гарні результати десульфурації сталі дає обробка металу в ковші рідким синтетичним шлаком. Опис процесу десульфурації дозволяє спростити технологію плавки, перенісши ці операції в ківш [15].

Завданням відновлювального періоду плавки є десульфурація, розкислення сталі, а також очищення від неметалевих включень. Ретельність проведення відновлювального періоду плавки є необхідною умовою при отриманні конструкційної легованої сталі необхідної чистоти. Тому велике

число варіантів технології плавки (послідовність розкислення і легування) пояснюється удосконаленням техніки проведення заключного етапу плавки.

Відновлювальний період починається після скачування окисного шлаку. В сучасній технології передбачається можливість деякого науглецьовування металу (на 0,10 - 0,15%) в момент підготовки ванни до відновлювального періоду. Після науглецьовування ванни додають: шлакову суміш, що складається з вапна, плавикового шпату, шамотного і динасового бою і карбідної суміші.

Після витримки ванни під карбідним шлаком продовжують дифузійне розкислення меленим 75%-ним феросиліцієм в суміші з вапном і плавиковим шпатою; цю суміш додають на шлак невеликими порціями приблизно через кожні 10 хв. рівномірно по всьому дзеркалу ванни, щоб звести до мінімуму осаджуваче розкислення. З цією ж метою перед додаванням нової порції суміші ванну перемішують.

Дослідами було встановлено, що легувати сталь хромом доцільніше на початку рафінування, а не після витримки під карбідним шлаком, як це робилося раніше. Такий прийом полегшує коригування хімічного складу ванни, а також сприяє очищенню її від включень окислів хрому. Було визначено також, що більш пізнє введення ферохрому на високовуглецевих марок сталей сприяє утворенню карбідної полосчатості в готовому прокаті [16]. Тому основна кількість ферохрому додається у ванну на самому початку відновлювального періоду, а потім проводять коригування невеликими добавками ферохрому; при цьому вміст вуглецю в сталі можна регулювати додаванням ферохрому відповідної марки.

В даний час вважається достатнім мати в шлаку близько 2% карбіду кальцію. Дослідженням [17] було встановлено, що високий вміст карбіду кальцію в останньому шлаку сприяє додатковому забрудненню сталі. Тому вважають, що якщо вміст карбіду кальцію в шлаку через 40 хв. після добавки відновлювальної суміші з меленим коксом буде близько 2%, то до моменту випуску плавки карбід кальцію зруйнується природним шляхом плавки.

Для досягнення необхідної повноти десульфурзації сталі вміст СаО в першій пробі шлаку повинен бути не менше 55%. Достатня рідкорухливість такого шлаку підтримується добавками плавикового шпату, шамоту і іноді динасового бою.

Необхідною умовою для отримання низького вмісту сірки в сталі є гарне розкислення шлаку відновного періоду: при утриманні закису заліза в шлаку не більше 0,60% сірка в готовому металі міститься в мінімальній кількості.

Оптимальна тривалість відновного періоду становить 1 год. 40 мин. - 2 години. В даний час температура металу в печі перед випуском повинна бути в межах 1560-1590 ° С.

1.6 Загальна характеристика плазово-дугового нагріву

Розробка нових металевих матеріалів з високими фізичними властивостями по суті вичерпала всі можливості класичних металургійних процесів. Справжні і особливо майбутні вимоги до підвищення міцності, корозійної стійкості, магнітних і електричних властивостей та інших фізичних параметрів металу можуть бути виконані тільки шляхом застосування нетрадиційних способів виробництва металів і сплавів.

Плазмова металургія створює умови для задоволення вимог до показників міцності матеріалів в умовах наднизьких, нормальних і підвищених температур, які висуваються в даний час і зберігаються в майбутньому. Це відноситься і до вимог ядерної енергетики, електротехнічної промисловості, машинобудування та інших галузей промисловості, що розвиваються. Поряд зі способами ЕШП і ЕПП плазово-дуговий переплав є ще одним методом електрометалургії, який характеризується широкими технологічними можливостями і значним економічним ефектом, що проявляється в кінцевій якості промислової продукції та ефективності технологічного устаткування, де можуть бути

використані матеріали тільки з виключно високими фізичними властивостями.

Дослідження, спрямовані на розробку методів плазмової плавки металів, були розпочаті в першій половині 60-х років такими країнами, як СРСР, США і Японія, а також ГДР, Бельгія, Франція та ін. По мірі вивчення властивостей плазмового розряду і вдосконалення конструкцій плазмотронів стало ясно, що його застосування може підвищити технологічні переваги існуючих сталеплавильних процесів і дозволить створювати нові оригінальні процеси, що володіють специфічними перевагами.

В цілому переваги плазмового нагріву стосовно до сталеплавильного виробництва обумовлюються наступними особливостями:

- можливість обробки розплавів газами в «активізованому стані»;
- високою стабільністю та урегульованістю розряду в широкому діапазоні тисків: від декількох сотень тисяч до десятих долей паскаля;
- можливістю створення у плавильному об'ємі плазмових печей контрольованої атмосфери (нейтральної, відновної, окислювальної), а в герметичних агрегатах - підвищеного тиску або вакууму;
- високою питомою потужністю плазмотронів;
- плазмовий розряд є «чистим» джерелом нагріву, тобто не вносить будь-яких забруднень у метал (при відповідному контролі атмосфери);
- плазмові розряди будь-якого типу, що використовуються в металургії, є практично безшумними [18].

Плазмова плавка є найбільш високопродуктивним процесом серед усіх існуючих способів спеціальної електрометалургії. Стосовно конкретних методів плавки є додаткові переваги, пов'язані зі специфікою цих процесів.

Застосування плазмового нагріву в сталеплавильному виробництві розвивається за трьома основними напрямками:

- 1) плазмова плавка сталей і сплавів в печах з керамічним тиглем (типу Лінде);

- 2) різні модифікації методу плазмово-дугового переплаву (ПДП) в печах з кристалізатором;
- 3) використання плазмового нагріву в комбінації з іншими способами нагрівання для підвищення технологічності і економічності існуючих методів виплавки сталі, наприклад індукційної плавки з плазмовим підігрівом.

Нині створено досить надійні конструкції плазмових печей і потужних плазмотронів (до 4 МВт), розроблені технологія легування сталей різного типу азотом з газової фази і технологія виплавки складнолегованих (зокрема, високохромистих) сталей з вмістом азоту $<0,025\%$, процесів розкислення і десульфурації.

Переплавні печі з кристалізатором можна умовно розділити на два класи: печі, що працюють при нормальному або підвищеному тиску, і установки, що працюють при низькому тиску. Перший спосіб називають методом плазмово-дугового переплаву, другий - методом вакуум-плазмового переплаву (ВПП). Обидва методи по своїм можливостям перспективні і технологічно ефективні. Методи плазмового переплаву дозволяють використовувати шлаки, варіювати в широких межах тиск і склад атмосфери, незалежно регулювати потужність і швидкість переплаву, тобто забезпечують більш гнучке регулювання умов кристалізації та рафінування, ніж методи ВДП і ЕШП.

Метод ПДП дуже ефективний для виробництва сталей з особливо високим вмістом азоту, прецизійних сплавів, ряду жароміцних сплавів. Особливо перспективний він для виробництва високоміцних марганцевих сталей.

Процес ВПП забезпечує рафінування хромонікелевих сплавів і нержавіючих сталей від азоту на 60...70% при мінімальних втратах легуючих, зокрема хрому 1... 1,5% відн. Для порівняння, метод електронно-променевого переплаву забезпечує приблизно таку ж ступінь рафінування, що і ВПП, але при набагато більших (на порядок) втратах легуючих в результаті випаровування, а ступінь рафінування складнолегованих сталей і сплавів від

азоту при вакуумно-дуговому переплаву нижче (не перевищує 10... 15%), ніж при ВПП.

Використання процесів ВПП і ПДП дозволяє істотно підвищити якість і стабільність властивостей металів, які виплавляють методами ВДП і ЕШП, розширити сортамент сталей і сплавів, вироблених переплавними процесами, освоїти виробництво принципово нових марок сталей і сплавів, виробництво яких існуючими методами неможливо (наприклад, сталей з особливо високим вмістом азоту, що значно перевищує його стандартної розчинності).

Плазмовий нагрів також може бути використаний для обігріву ковша при позапічній обробці сталі, створення комбінованих технологічних схем виробництва сталі, створення напівбезперервних сталеплавильних процесів [19].

1.7 Ресурс роботи плазмотронів

Плазмова металургія почала інтенсивно розвиватися в 1960-х рр. [20] і в даний час застосовується в промисловості багатьох технічно розвинених країн. Плазмовий нагрів використовують на багатьох стадіях металургійного виробництва, включаючи процеси вилучення металів з руд, виплавку і обробку металів і сплавів в плазмових реакторах і печах, а також для інтенсифікації існуючих способів плавки та переробки матеріалів.

Виплавку сталей і сплавів, а також переплав заготовок з метою підвищення якості металу виробляють в плазмодугових печах. Характерною особливістю і безперечною перевагою плазмового нагріву є можливість обробки металевого розплаву різними газовими сумішами відповідного складу при заданому тиску. Результати численних досліджень взаємодії газів з металами в умовах плазмово-дугової плавки і переплавки, а також технологічні особливості цих процесів узагальнені в ряді монографій [18].

Інертна атмосфера і відсутність традиційних для електродугової плавки джерел забруднення металу (наприклад, графітових електродів) дають

можливість отримувати зі звичайної шихти з високим вмістом відходів чистий метал, зокрема нержавіючі сталі з наднизькою масовою часткою вуглецю. При використанні в якості плазмоутворюючих аргоно-азотних газових сумішей проводять легування металу азотом без застосування азотованих феросплавів.

Ведення процесу плазмово-дугової плавки (ПДП) при підвищеному або нормальному тиску забезпечує збереження в сплавах легуючих елементів з високою пружністю пари (хрому, марганцю та ін.), насичення сплаву азотом, а при зниженому тиску - більш глибоку дегазацію металу (наприклад, титану).

ПДП застосовують для поліпшення якості спеціальних легованих сталей, прецизійних і жароміцних сплавів, тугоплавких металів, для отримання аустенітних сталей з підвищеним вмістом азоту, які не досягаються при інших способах плавки, для зниження втрат летючих і легкоокислюючих елементів. Застосування плазменнодугового нагріву при індукційній плавці скорочує тривалість розплавлення шихти і інтенсифікує процес рафінування металу.

Однією з основних проблем плазмової металургії є отримання низькотемпературної плазми. Найбільш поширені в плазмовій металургії дугові плазмотрони за принципом дії поділяють на два типи: з незалежною (струменевою) і залежною (прямою дією) дугою.

У струменевих плазмотронах (непрямої дії) електрична дуга горить між електродом і соплом, а саме між двома електродами, встановленими в плазмотроні. Через цю дугу продувають газ, який в результаті нагрівання частково іонізується. Нагрів та плавлення матеріалу, що оброблюється відбувається за рахунок тепловміщення плазмоутворюючого газу, що виходить з сопла плазмотрона у вигляді високотемпературного факела.

У плазмотронах прямої дії електрична дуга горить між електродом і нагрівається матеріалом. Матеріал нагрівається в основному за рахунок прямого впливу дугового розряду (основне тепловиділення відбувається в

приелектродних областях) і тільки 25% загальної кількості тепла передається потоком плазми [21].

Для інтенсифікації процесів нагрівання і плавлення матеріалу, що оброблюється можуть бути використані багатоатомні плазмоутворюючі гази. Високоентальпійна плазма таких газів, як водень і азот, забезпечує підвищену теплопередачу не тільки до оброблюваного матеріалу, але і з конструктивними елементами плазмотрона (електроду, сопла), що знаходяться в контакті з нею, що сприяє зниженню ресурсу його роботи.

Підвищення ресурсу роботи окремого плазмотрона і печі (реактора) є однією з основних проблем, що стримують застосування плазмотронів і розвиток плазмової металургії. Збільшення обсягів, що одночасно переробляються, а отже, і потужності плазмових агрегатів передбачає наявність надійних плазмотронів з високим ресурсом роботи. Якщо для процесів плазмового зварювання і різання металу в зв'язку з відносно невеликою їх тривалістю ресурс роботи різаків і пальників не має істотного значення (заміна відпрацьованих свій термін електродів і сопел вирішується досить швидко і просто), то для плазмової металургії, коли тривалість процесу може становити десятки, а іноді і сотні годин, ресурс роботи плазмотронів набуває вирішального значення.

Для заміни поламаних конструктивних елементів плазмотрона іноді доводиться зупиняти процес, відключати його від систем забезпечення, знімати плазмотрон з установки, розбирати на частини, що призводить до зниження ефективності, збільшення простоїв. Як правило, чим вище потужність плазмотрона, тим нижче його ресурс роботи, чим більше плазмотронів встановлено в плазмовому агрегаті, тим частіше його доводиться зупиняти для заміни відпрацьованих свій ресурс деталей.

Основними причинами виходу плазмотронів з ладу є пошкодження сопла і знос електрода. У плазмотронах з незалежною дугою знос сопла відбувається повільніше, ніж електрода-катода. Більш серйозною причиною виходу сопла з ладу є подвійне дугоутворення.

У плазмотронах з залежною дугою в результаті коливань параметрів роботи плазмотрона (різке збільшення струму, діаметру стовпа стислої дуги, зниження витрат або зміна характеру подачі газу, охолодження сопла та ін.) може статися електричний пробій між електродом і соплом. Внаслідок такого пробію замість однієї дуги, що горить між електродом і оброблюваним матеріалом, горять дві (між електродом і соплом, а також між оброблюваним матеріалом і соплом), що призводить до швидкого руйнування останнього.

Що стосується електрода, то ступінь його зносу є одним з найважливіших параметрів, який, в кінцевому рахунку, визначає ресурс роботи плазмотрона. Допустимий знос електрода залежить від конструкції плазмотрона, а швидкість ерозії - від умов технологічного процесу. Для характеристики швидкості ерозії електрода в умовах того чи іншого процесу використовують питому ерозію [22].

При генеруванні плазменно-дугового розряду для підтримки між електродами електричного струму електроди повинні постачати в плазму заряджені частинки. В силу тільки однієї цієї обставини не може не відбуватися руйнування поверхні матеріалу електродів.

Ерозія електрода плазмотрона є наслідком складних теплових, електричних, хімічних та інших процесів в приелектродній області, на поверхні і всередині матеріалу електрода. З використанням різних способів можна знизити швидкість ерозії, але не запобігти їй зовсім.

Можливі шляхи підвищення ресурсу роботи електродів плазмотрона і плазменно-дугової установки в цілому. З огляду на, що ерозія електроду в значній мірі має теплову природу, найбільш очевидним способом підвищення ресурсу його роботи є забезпечення оптимального (для даного матеріалу електрода) теплового стану. Електроди плазмотрона поділяють на гарячі (графіт, вольфрам, тантал та ін.) і холодні (мідь, сталь, алюміній).

Значення максимально допустимих теплових потоків, після яких починається інтенсивне руйнування, можуть істотно відрізнятись.

Так, холодні катоди можуть працювати тільки при відносно малих теплових потоках (не більше $1 \cdot 10^5$ кВт / м²), тому при використанні таких електродів потрібне застосування інтенсивного водяного охолодження.

Гарячі електроди також необхідно охолоджувати, проте їх безпосереднє охолодження через високі термічні напруги може привести до раптового руйнування і подальшого аварії, тому їх, як правило, встановлюють в спеціальних водоохолоджуючих пристроях - обіймах, затискачах та ін. Гарячі електроди, зокрема вольфрамові, доцільніше встановлювати без вильоту, тим самим забезпечуючи хороший тепловідвід і запобігаючи зносу їх бічної поверхні.

Подовжити термін служби вольфрамового електрода (катода), крім того, можна за рахунок підвищення значень його термоемісійних властивостей. Легування вольфраму такими елементами, як лантан (близько 1% La) і торій (приблизно 1,5% ThO²), дозволяє не тільки підвищити значення його термоемісійних властивостей, але і знизити питомий тепловий потік в катод.

Однак необхідно відзначити, що для оптимальної роботи електродів з легованого вольфраму, забезпечення відповідної швидкості дифузії і рівномірного виходу емісійного матеріалу потрібна відповідна температура не тільки робочої поверхні, але і всього електрода. Тому такі електроди встановлюють, як правило, з деяким вильотом [18].

Істотний вплив на роботу вольфрамового електрода надають структура матеріалу, наявність домішок і їх характер. Збільшення дисперсності і однорідності як включень, так і матеріалу основи електрода сприяє зниженню процесу утворення дислокацій і їх розвитку.

Для подовження терміну служби іноді використовують катоди з пористого вольфраму ($\Pi = 20\%$). При подачі аргону через пористий катод відбувається його більш інтенсивне охолодження.

Крім пористих катодів, існують різні термоемісійні вставки з порошкових матеріалів, в основі яких лежать оксиди підгрупи титану з

різними добавками. Питома ерозія таких електродів при значеннях струму до 1000 А становить приблизно $1 \cdot 10^{-10}$ кг / Кл.

Швидкість ерозії вольфрамового електрода (або іншого термокатоду) істотно залежить і від його діаметра. При збільшенні діаметра вольфрамового катода (від 2 мм) спочатку різко знижується рівень питомої ерозії, а потім плавно підвищується. Оптимальний діаметр вольфрамового електрода, при якому питома ерозія мінімальна, становить 4...5 мм для електродів, що працюють при значеннях струму приблизно 400 А, і 5 ... 6 мм - при струмі близько 1000 А [23].

Крім іншого, швидкість ерозії електрода залежить і від характеру прив'язки (дифузна або контрагірована) до нього стовпа дуги. В результаті контрагірування дуги виникають так звані катодні і анодні плями з високою щільністю струму.

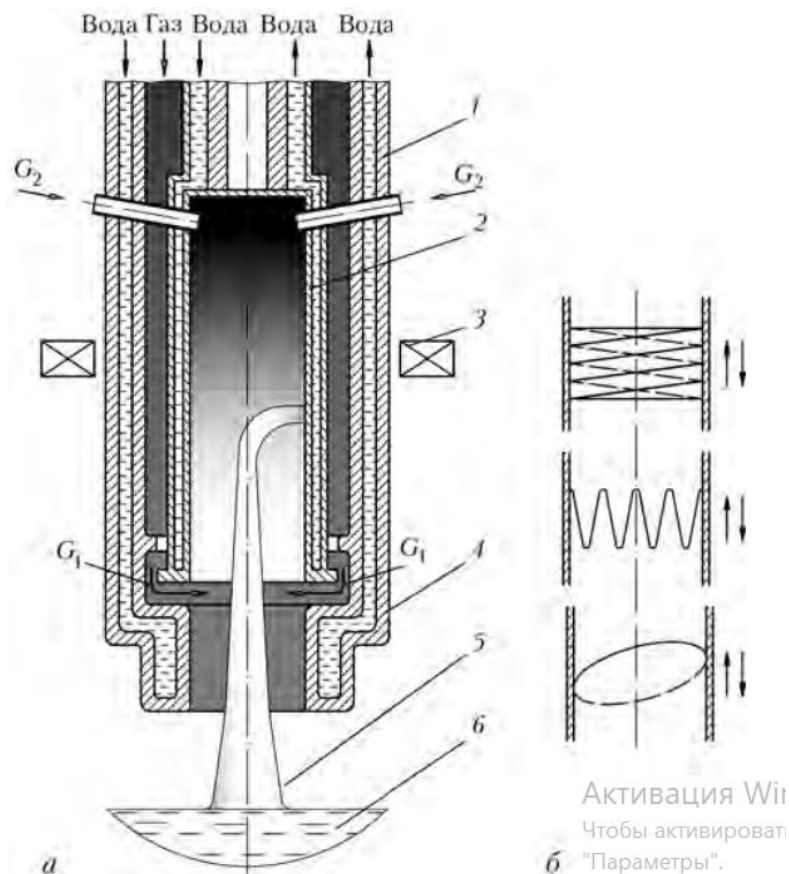
Найбільш інтенсивна ерозія відбувається, як правило, в катодних плямах. Якщо плями утворюються на холодних катодах, то існує можливість викиду крапель металу електрода при кипінні.

Таким чином, контрагірована прив'язка підвищує ступінь ерозії. Однак в разі дифузної прив'язки з великою довжиною вильоту вольфрамового катода ($l_k > 0$) ерозія може бути вище, ніж для контрагірованої прив'язки з $l_k = 0$.

Одним із шляхів подовження ресурсу роботи електродів є пересування плями дуги по їх поверхні. З одного боку, це дозволяє зменшити питомий тепловий потік в електрод і тим самим знизити швидкість ерозії; з іншого, - навіть при тій же швидкості втрати матеріалу електродом в разі істотного збільшення площі, з якої відбувається винесення матеріалу, загальний ресурс роботи електрода зростає. Переміщення плями дуги по поверхні електрода може здійснюватися різними газодинамічними і електромагнітними способами розкрутки дуги або їх комбінаціями. На поверхні електрода з'являється вузька ерозійна доріжка (слід), відповідна траєкторії руху опорної плями дуги. Для збільшення площі робочої поверхні електродів, а отже, і

ресурсу їх роботи, переміщують плями дуги не тільки навколо, але і вздовж осі електрода (порожністі електроди). При цьому плями здійснюють зворотно-поступальний рух в поздовжньому напрямку, яке називається скануванням.

Шляхом зміни співвідношення частоти обертання плями прив'язки дуги і частоти сканування можна отримати різні типи траєкторії дугової плями на внутрішній поверхні порожнього електрода (рис. 2).



1 – корпус, 2 - порожнистий електрод, 3 – електромагнітна котушка,
4 – сопло, 5 - дуга; 6 - розплав; G_1 , G_2 – витрата газів

Рисунок 2 - Схема плазмотрона з порожнистим електродом і переміщенням плями дуги по поверхні електрода (а), а також типи траєкторій плями дуги по внутрішній поверхні порожнього електрода (б)

Принципово важливими з точки зору ресурсу електрода є не тільки площа сканування, але і рівномірне відпрацювання цієї поверхні.

Для забезпечення рівномірності зносу робочої поверхні застосовують різні заходи (безперервне або дискретне сканування, спеціальні схеми підключення магнітних лінз, дотримання необхідного кута зсуву фаз між двома лінзами та ін.).

Площа сканування визначається внутрішнім діаметром електрода і довжиною ділянки сканування. Для кожного внутрішнього діаметра полого електрода існує критичне значення струму, при якому відбувається стрибкоподібне зростання швидкості ерозії (зі збільшенням діаметра рівень критичного струму зростає).

Істотний вплив на ресурс роботи електрода плазмотрона надає склад навколишньої атмосфери, особливо присутність кисню, водню. Наприклад, при концентрації кисню в плазмоутворюючих газах (азоті) більше 0,7% значення питомої ерозії вольфраму різко зростає і досягає (2 ... 4) 10⁻⁸ кг / Кл.

З ростом тиску плазмоутворюючого газу рівень питомої ерозії електродів також підвищується. Збільшити ресурс роботи електродів в тім або іншій середовищі можна лише в результаті правильного вибору матеріалу електрода, його розмірів і забезпечення оптимальних умов охолодження.

Найбільш сильний вплив на ерозію електродів надає значення струму, що протікає через них. Тому застосовують різні заходи, які сприяють зниженню струмового навантаження на електрод (розщеплення стовпа дуги, робота при високих значеннях напруги і зниженому струмі або застосування різних багатоелектродних схем).

Розщеплення дуги або її частини на кілька струмопровідних каналів може бути здійснено як на катодному, так і на анодному радіальних ділянках шляхом створення на внутрішній поверхні електрода локальних місць переважної прив'язки дуги, наприклад приміщенням в тіло мідного трубчастого електрода термоємисійних вставок.

Існують також електроди з цільним мідним наконечником, в якому встановлено безліч термокатодних вставок (складальні катоди).

Процес переміщення дуги тут відбувається спонтанно, тому ерозія вставок нерівномірна. В процесі роботи електрода дуга або перескакує з однієї вставки на іншу, або розщеплюється на кілька каналів.

Використання високої напруги в плазмотронах дозволяє в разі однакової потужності працювати при відносно малих значеннях струму дуги і забезпечувати при цьому підвищений ресурс роботи електродів. Однак застосування високого значення напруги збільшує габарити плазмотронів, ускладнює їх експлуатацію і може призводити до непрогнозованих виходів з ладу в результаті пробую по ізоляційним вставкам.

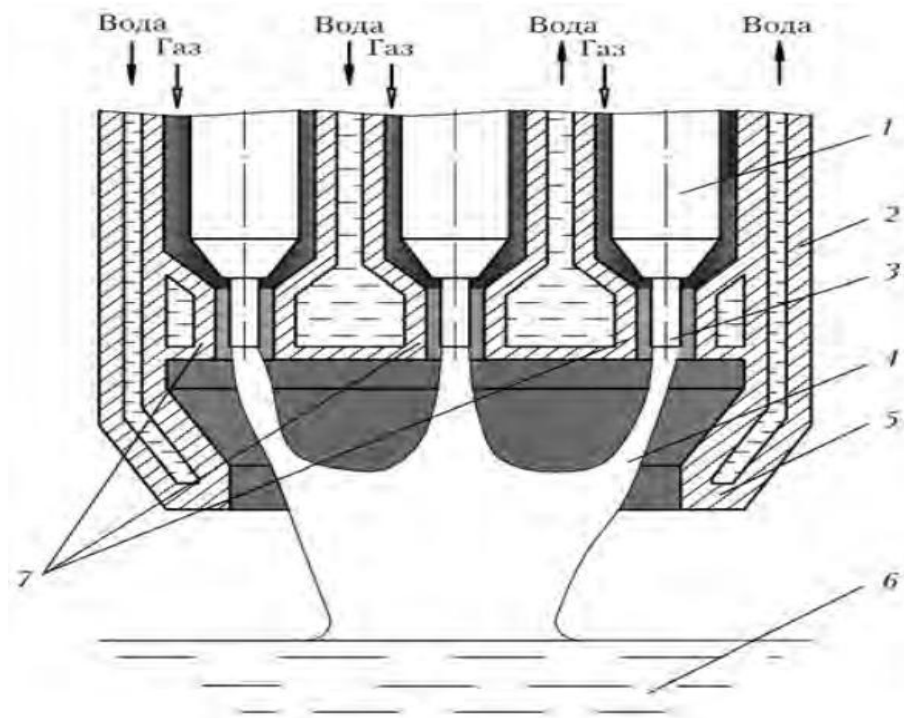
Застосування багатоелектродних схем, на відміну від розщеплення вже наявного стовпа дуги, припускає утворення спочатку кількох окремих дуг з подальшим їх зведенням в одну загальну великої потужності. Спосіб розщеплення дуги використовується в плазмотронах побічної дії, а багатоелектродні схеми - в плазмотронах прямої дії. З огляду на, що ресурс роботи катода і анода неоднаковий (іноді відрізняється на порядок), то для підвищення загального ресурсу роботи плазмотрона може бути використана зміна полярності на електродах, а саме робота на змінному струмі.

Дійсно, поряд з плазмотронами постійного струму все ширше застосовуються багатоелектродні плазмотрони змінного струму, що характеризуються більшою одиничною потужністю, в порівнянні з плазмотронами постійного струму.

Останнім часом велика увага дослідників і розробників зосереджена на створенні загального дугового стовпа шляхом «стягування» одиночних малопотужних локальних дуг багатоелектродного плазмотрона (рис. 3) [24]. Для цього слід виключити шунтування, «перекидання» окремих локальних дуг на сусідні електроди.

Необхідне підвищення потужності плазмових плавильних агрегатів може бути отримано в результаті їх оснащення кількома одночасно

працюючими окремими плазмотронами. Така піч може живитися від трифазної системи і забезпечувати рівномірне навантаження на електричну мережу, а кожен окремий плазмотрон – працювати за однофазною схемою.



1 – електродотримачі, 2 – корпус, 3 – електрод, 4 – дуга,
5 - загальне сопло, 6 – розплав, 7 – стабілізуючі сопла

Рисунок 3 - Схема багатоелектродного металургійного плазмотрона

Наявність декількох плазмотронів дозволяє обробляти більший обсяг матеріалу при відносно невеликій потужності самого плазмотрона.

Необхідно відзначити, що підвищення потужності плазмової печі за рахунок збільшення кількості встановлених в них плазмотронів не може відбуватися нескінченно.

Зі збільшенням кількості плазмотронів істотно ускладнюється конструкція агрегату, утруднюється його обслуговування і збільшується тривалість простоїв. Тому зазначені агрегати стають економічно недоцільними, а підвищення одиничної потужності плазмотрона продовжує залишатися актуальним завданням.

Ще один шлях зниження навантаження на електрод плазмотрона полягає в застосуванні схем, що працюють за принципом каскадного посилення. Прикладом такого посилення може служити спосіб, заснований на примусовій генерації заряджених частинок в приелектродній області дуги.

На першому етапі слабкострумовий плазмотрон (плазмовий електрод) забезпечує деяку кількість заряджених частинок для роботи основного електрода, яка на другому етапі доповнюється за рахунок основного електрода. При цьому основний електрод працює в умовах порівняно низьких температур поверхні, а значення робочого струму плазмотрона визначається загальною кількістю носіїв електрики. Ресурс роботи даного плазмотрона при струмі 10 кА може досягати 200 год.

Підвищення загального ресурсу роботи дугового плазмотрона може бути здійснено і альтернативними шляхами - не збільшення ресурсу одного електрода, а його періодичної заміною безпосередньо в процесі роботи по міру зносу. Як правило, така заміна проводиться за допомогою багатопозиційного катодного вузла. Кількість електродів-вставок і відстань між ними при рівномірному розподілі по колу катодного вузла вибираються згідно необхідного часу безперервної роботи плазмотрона.

У технологічних процесах, де ерозія електродного матеріалу не впливає на якість одержуваного продукту, можуть бути використані і електроди, що витрачаються, і плазмотрони. Так плазмотрон, що витрачається застосовують при плазмово-дуговій виплавці великих сталевих зливків.

По суті, плазмотроном, що витрачається є порожниста сталева заготовка, яку піддають переплаву [24].

Існують схеми плазмових реакторів з рідкометалевими електродами [23]. Використання рідкого металу в якості електродів і особливості конструкції дозволяють говорити про практично необмеженій ресурс роботи електродів, високих значеннях струму і ККД дуги. Однак незважаючи на всі переваги конструкції таких плазмотронів-реакторів і технології переробки, наприклад різних відходів, досить дорогі і складні. Тому їх слід

використовувати для переробки небезпечних відходів, знищення хімічної зброї або інших спеціальних цілей.

2 КОНСТРУКЦІЯ ОСНОВНОГО ПІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ

2.1 Плавильні плазмові печі з керамічним тиглем

В даний час існує два основних напрямки розвитку плазмових печей. До першого напрямку відносяться плазмові плавильні печі, що працюють за тим же принципом, що і звичайні дугові печі, з тією різницею, що замість електродів застосовані плазмотрони і в подині печі встановлений спеціальний подовий електрод для підведення струму до шихті. Робочий простір герметизовано, що забезпечує можливість підтримання стабільного складу інертної атмосфери. Печі цього типу можуть бути забезпечені порівняно простими пристроями для електромагнітного перемішування рідкого металу.

До другого напрямку відносяться переплавні плазмові печі з водоохолоджуваними металевими кристалізаторами. Конструкція цих печей аналогічна конструкції електронно-променевих печей з тією лише різницею, що замість електронних гармат застосовані плазмотрони, а печі працюють переважно при тиску інертного газу близько 10^5 Па. В окремих випадках печі можуть працювати в умовах вакууму або надлишкового тиску. З метою зниження витрат, пов'язаних з використанням інертних газів, плазмові печі можуть бути забезпечені системами регенерації газу.

Виплавка металів у плазмових печах з керамічним тиглем має наступні переваги:

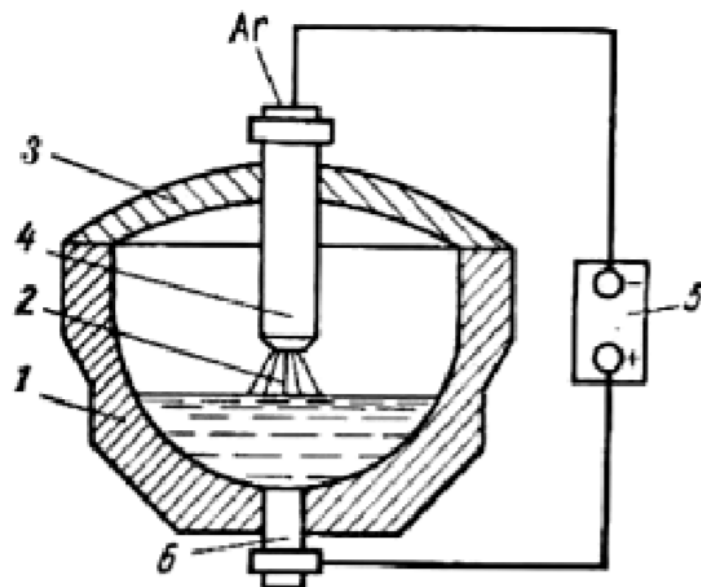
1. Обмеження забруднення металу вуглецем з графітових електродів, що застосовуються в звичайних дугових печах.
2. Можливість застосування інертної атмосфери, що попереджає поглинання металом азоту і водню з повітря, що спостерігається у звичайних дугових печах.
3. В якості плазмоутворюючого газу може бути використана будь-яка газова суміш, що забезпечує можливість отримання в печі точно

контрольованої атмосфери — окисної, відновлювальної або інертної.

4. Умови дегазації рідкого металу в плазмових печах з інертною атмосферою з точки зору термодинаміки наближаються до умов, що створюються при переplаві в дорогих вакуумних печах, тому що парціальний тиск кисню, водню і азоту в печах з плазмотронами, що працюють на інертному газі, дуже низька. Так, наприклад, переplав в атмосфері інертного газу, містить близько 0,05% (абс.) активних газових домішок, за термодинамічних умов еквівалентний вакуумному процесу, що протікає при 66,6 Па.

5. За допомогою плазмотронів можна досягти високих і легко регульованих температур. Висока стабільність процесу полегшує його управління.

Переplав у плазмових печах на відміну від вакуумних індукційних, дугових або електроннопроміневих печей забезпечує (внаслідок атмосферного тиску в робочому просторі над рідкої ванною) набагато менше випаровування легуючих компонентів з розплаву (рисунок 4).



- 1 - корпус печі, 2 - плазмова дуга, 3- склепіння; 4 – плазмотрон,
5 - джерело живлення, 6 - подовий водоохолоджуваний електрод

Рисунок 4 - Схема плазмової печі з керамічною футеровкою

Порівняно високі концентрації енергії в малому об'ємі, швидкість витікання плазми і дуже швидка передача тепла матеріалу, що нагрівається, при порівняно малих втратах тепла випромінюванням, забезпечують високу швидкість переплаву в плазмових печах. Порівняно з вакуумними печами простота конструкції плазмових печей полегшує проведення таких технологічних операцій, як наведення шлаку, продувка металу та інше.

Плазмові печі з подиною, футерованою вогнетривами, були споруджені, наприклад, в СРСР, США, Німеччині, Великобританії та Японії. Плазмові печі різної потужності і розмірів проектують і будують на фірмі Linde (США). Для прецизійного лиття випускаються печі малої ємності (12 кг) потужністю 40 кВт. Швидкість плавлення досягає 1,2 кг/хв. Тривалість завантаження, легування і випуску металу порівнянна з індукційної піччю. Стійкість футеровки становить приблизно 200 плавок. Для виплавки якісних високоміцних сталей і спеціальних сплавів, що розливають у виливниці або ливарні форми і призначених для нових галузей промисловості, фірма Linde випускає печі ємністю від 25 кг до 1,7 т. Потужність печі ємністю 140 кг становить 120 кВт. Піч ємністю 0,9 т обладнана одним плазмотроном, печі більшої ємності оснащені декількома плазмотронами.

Плазмотрон працює на постійному струмі, анодом служить метал, що розплавляється. Водоохолоджуваний катод виготовлений зі сплаву на основі вольфраму, він захищений від бризок металу і шлаку мідним водоохолоджуваним соплом. Стовп плазмової дуги стабілізовано аргоном. Технічний аргон, який використовується для стабілізації дуги, одночасно створює у печі захисну атмосферу. Описана установка відрізняється простотою і експлуатаційної надійністю.

Для перемішування рідкого металу в подину печі вмонтовані два соленоїда. Магнітне поле цих соленоїдів, взаємодіючи з магнітним полем, створюваним електричним струмом, що протікає через ванну, приводить рідкий метал в до руху.

Перемішування металу в плазмовій печі має дуже важливе значення з

двох причин.

1. Технологія переплаву в інертній атмосфері плазмової печі така, що період окислення, при якому в звичайній печі відбувається інтенсивне перемішування металу піднімаються вгору бульбашками окису вуглецю, відсутня.

2. Стовп плазмової дуги є набагато інтенсивнішим і більш концентрованим джерелом тепла, ніж звичайна електрична дуга. В умовах слабого перемішування, викликаного тільки впливом самої плазмової дуги метал би сильно перегрівався і випаровувався в області анодної плями. На подині печі протягом тривалого часу могли б залишатися шматки шихти, що не розплавилася. Відомі й інші схеми електромагнітного перемішування [25].

Стовп плазмової дуги, стабілізований газом, має температуру $2 \cdot 10^4$ К; він спрямований безпосередньо на метал в напрямку осі плазмотрону. Дуга горить настільки стабільно, що коливання сили струму і напруги не перевищують 2% від встановлених значень. У звичайній дуговій печі коливання сили струму досягають $\pm 50\%$ від середнього значення. Оператор може точно регулювати потужність печі і підтримувати її на максимальному рівні.

Висока стабільність плазмової дуги пояснюється тим, що перепад напруги в стовпі плазми, що виникає в інертній атмосфері, набагато менше, ніж в повітряній атмосфері. Тому коливання довжини стовпа плазмової дуги при розплавленні або падінні шматка шихти дуже мало відбиваються на електричних параметрах.

У плазмовій печі фірми Linde ємністю 0,9 т звичайна довжина плазмової дуги 910 мм, а в печі ємністю 140 кг близько 150 мм. Тому в плазмових печах фірми Linde сопло плазмотрона знаходиться під самим склепінням печі і залишається в цьому положенні протягом всієї плавки, що виключає можливість виникнення короткого замикання та пошкодження плазмотрона.

На печах з поворотним склепінням завантаження може здійснюватися

вручну, за допомогою спеціальних живильників або завалочного кошика, який подається зверху. В стінах печі є дверцята, розташовані навпроти випускного отвору, через них можна подавати легуючі, завантажувати шлак або проводити ремонт. Піч за допомогою електричного або гідравлічного приводу можна нахилити в бік випускного отвору [19].

2.2 Плазмотрон для плавки металів

Плазмотрони для плавки металів використовують для плавки і переплаву в чорній і кольоровій металургії з використанням в якості плазмоутворюючих газів аргону, азоту, водню та їх сумішей. Такі плазмотрони працюють в печах при тисках від атмосферного і нижче.

Розряд у таких плазмотронах запалюють між термостійним катодом і допоміжним електродом, а основний (робочий) розряд утворюється між катодом і металом в печі. Плазмоутворюючий газ подають між катодом і соплом, яке виконує також функцію захисної діафрагми, або через порожнину в катоді.

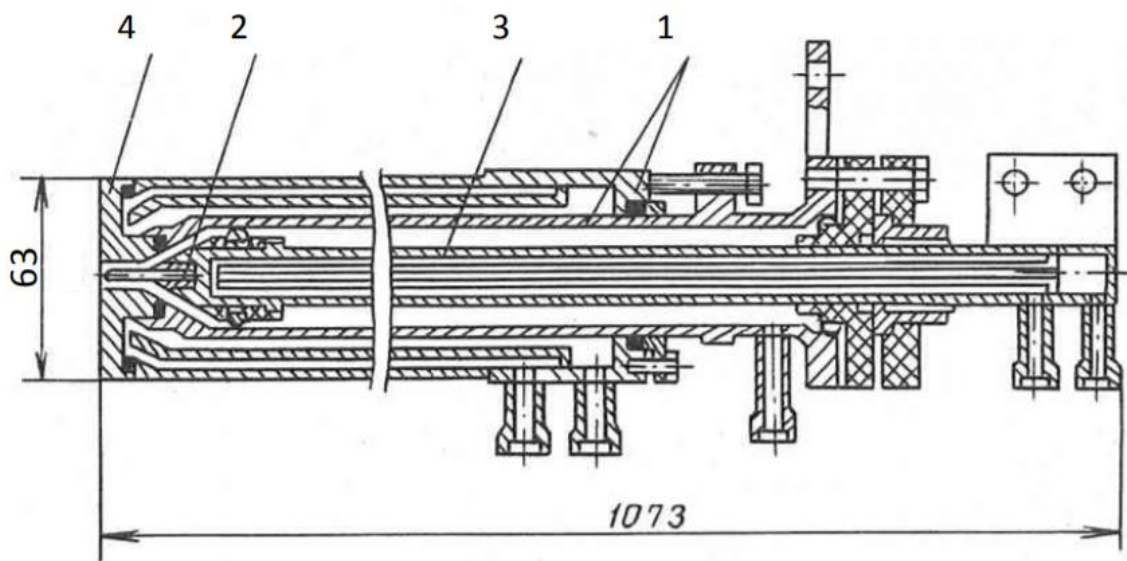
Як і у всіх плазмотронах з зовнішньої дугою велика частина знаходиться розряду поза плазмотрона. Канал сопла зазвичай короткий і стабілізує тільки початкову ділянку стовпа дуги.

Потужність існуючих плавильних плазмотронів в межах від десятків кіловат до декількох мегават, струм розряду (100...10000) А при відносно невисокій напрузі до 200 В.

Особливістю застосування плавильних плазмотронів є необхідність введення плазмотрона в піч через товстий шар футеровки склепіння печі. Тому в конструкції плазмотрона присутній довгий корпус, на одному кінці якого розташована розрядна частина – власне електроди, а на протилежному кінці корпусу розміщують приєднувальні пристрої – підводи струму, газу, охолодження частин плазмотрона, а також фланець кріплення плазмотрона до корпусу печі.

Електроди і корпус плазмотрона охолоджують водою. Катод плазмотрона ПТП – стрижневий, з вольфраму з присадками. Сопло – мідне. Катод і сопло змінні. Анодом є метал, що переплавляється. Струм розряду 1500 А, потужність до 200 кВт, постійний струм.

На рисунку 5 показана схема аналогічного плазмотрона для плазмо - відновлювальних процесів в металургії і для розплавлення вихідної сировини.



1 – корпус, 2 – катод, 3 – катодотримач, 4 – сопло (допоміжний електрод)

Рисунок 5 - Плазмотрон ПТП-25М для плавки та переплаву чорних і кольорових металів

Плазмотрон використовує природний газ в суміші з повітрям, що подаються між корпусом і соплом. Захисний газ - аргон, азот подають в зазор між соплом і катодом, а також в порожнину катода. Катод з вольфраму з легуючою присадкою, порожнистий, змінний. Сопло мідне, змінне, охолоджуване водою [22].

2.3 Плазмоутворюючі гази

Плазмоутворюючі гази можуть складатися з чистих газів або їх сумішей, тобто бути одно - і багатокомпонентними. Від складу плазмоутворюючого газу залежать конструкція і енергетичні параметри плазмотрона, тип і електричний режим джерела живлення, основні технологічні та економічні показники металургійного процесу.

В якості плазмоутворюючого середовища застосовують аргон, гелій, азот і водень. Підбором складу компонентів можна створити будь-яку середу:

- окислювальну, наприклад кисневовмісні суміші плазмової різки;
- відновну, наприклад воденьвмісні суміші рафінування металів.

Чисті гази, які використовують в техніці, як правило, мають великі домішки попутних газів, тому, строго кажучи, поняття однокомпонентної плазми дещо ідеалізовано. Так, в аргонівій плазмі крім атомів і іонів аргону присутні в невеликих кількостях атоми, іони та молекули кисню, водню, вуглецю, азоту та їх сполуки.

Фізичні властивості металів у великій мірі залежать від кількості розчинених у них або хімічно пов'язаних газів. Вміст газів у металі після переплаву залежить від їх парціального тиску в пічній атмосфері. Особливо чутливі до атмосфери плавильних печей високореакційні метали. Аргон технічний може містити неприпустиму кількість інших газів, таких як азот, кисень, вуглеводень, а також вологу. У зв'язку з високою реакційною здатністю цих газів у збудженому, атомарному та іонному станах, а також з урахуванням принципу роботи плазмових печей необхідно знижувати їх зміст.

У більшості випадків при плавленні металів це не грає особливої ролі, але в ряді випадків, наприклад у переплавних процесах, вимоги до чистоти газу бувають досить високі, тому плазмоутворюючий газу піддають очищенню.

Аргон – газ, який найбільш часто і в найбільших кількостях

застосовується у плазмовій металургії. Аргон використовується для стабілізації дугового розряду плазмотрона, він є середовищем, що передає тепло матеріалу, який нагрівається, і служить захисною робочою атмосферою у плазмових металургійних агрегатах.

Для плазмовій металургії можливо застосовувати суміш аргону з воднем, азотом або гелієм. Для споживачів аргону вигідною є доставка аргону в рідкому стані в спеціальних резервуарах. Газифікація аргону здійснюється вже у споживача в газовипаровувачах. Застосування резервуара для рідкого аргону знижує транспортні витрати і спрощує поводження з судинами високого тиску порівняно малої ємності.

Аргон володіє високою провідністю і найнижчою величиною ентальпії. Недостатньо високі електричні та теплофізичні характеристики аргону, як плазмоутворюючого газу, можна компенсувати значним підвищенням його витрати, але аргон - один з найбільш дефіцитних і дорогих газів. Його застосування визначається тим, що він інертний і створює «хімічний вакуум», що сприяє глибокому рафінуванню металів від шкідливих домішок без втрат основного металу.

Азот при високих температурах володіє досить високими значеннями ентальпії, теплопровідності і теплоємності, в результаті чого електричний розряд в атмосфері азоту забезпечує достатньо ефективне перетворення електричної енергії в теплову і передачу її металу. На користь застосування азоту говорять його доступність і низька ціна. Широке застосування азоту в якості однокомпонентного плазмоутворюючого середовища обмежено внаслідок можливого руйнування вольфрамового катода, оскільки при високій температурі на його поверхні утворюються нітриди вольфраму. Крім того, використання технічного азоту, що містить до 2% кисню, призводить до руйнування катода в результаті утворення при температурах > 600 °C летючих оксидів типу WO_3 , W_2O_3 , W_2O_5 . Тому азот в основному використовують в якості добавки до аргону при виплавці азотованих сталей.

Гелій володіє більш вигідними енергетичними характеристиками, ніж

аргон, однак він дуже дорогий і дефіцитний, тому використовується лише в якості добавки до Ar.

Водень - самий високоентальпійний плазмоутворюючий газ, однак чистий водень при високих температурах руйнує катод. Його використовують для отримання сталей і сплавів високої чистоти [26].

3 ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1 Дослідження методики по азотуванню сталі

Лабораторні експерименти з дослідження взаємодії газоподібного азоту з легованим розплавом проводилися на установках спеціальної електрометалургії:

1. Установа плазменно-дугового переплаву № 1 (горизонтальне розташування плазмотрона, плазмова дуга покриває заготовку, що оплавляється, яка підводиться паралельно плазмотрону), ПДП № 1;

2. Установа плазменно-дугового переплаву № 2 (вертикальне розташування плазмотрона, плазмова дуга покриває ванну рідкого металу та заготовку, що оплавляється і підводиться перпендикулярно плазмотрону), ПДП № 2.

Експерименти проводили з використанням сталі наступного складу: 0,115% С, 0,39% Si, 0,94% Mn, 8,5% Cr, 0,83% Mo, 0,75% Ni, 0,70% W, 0,50% V, 0,0074% N, 0,41% Nb, P не більше 0,001%, S не більше 0,001%.

Особливості хімічного складу вихідної заготовки обумовлюються наступними параметрами.

Введення молібдену і ванадію є обов'язковим з точки зору забезпечення необхідного рівня властивостей в сталях, що працюють тривалий час при підвищених температурах. Молібден і ванадій сприяють зміцненню твердого розчину і стабілізації зміцнюючих фаз.

Перевищення вмісту ванадію за позначені межі призводить до утворення надлишкової кількості нітридної фази і виділенню її в вигляді скупчень, що призводить до зниження пластичних характеристик.

При зниженні ванадію нижче 0,15% не забезпечується необхідна кількість нітридної фази для отримання необхідних міцностних властивостей. У сталях мікролегованих ванадієм спостерігається явище вторинної твердості при нагріванні в інтервалі температур 550-650⁰С, тобто

в області робочих температур теплостійких сталей. Ця обставина дозволить додатково збільшити міцність сталі в умовах експлуатації. Підвищення вмісту ванадію більше 0,8% призводить до утворення грубих включень карбонітридів ванадію, що негативно позначається на ударній в'язкості.

Ніобій, також як і ванадій, є карбидоутворюючим елементом. Дисперсійні карбонітриди ніобію затримують процеси рекристалізації, сприяючи подрібненню структури сталі. Крім того, дисперсні карбонітриди ніобію створюють ефект дисперсійного зміцнення, що підвищує межу плинності сталі.

3.1.1 Установа ПДП №1 з горизонтальним розташуванням плазмотрона

Лабораторна установка включає плазмотрон з незалежною дугою та заготовку, що переплавляють (діаметр 22,5, довжина 300 мм), яка підводиться до плазмотрону горизонтально за допомогою спеціального пристрою, і мідну водоохолоджувальну підкладку, на якій шляхом «зкапування» отримували готовий метал.

Канал плазмотрона, що представляє собою практично внутрішній канал анода, на рисунку 6 показаний таким, що розширюється, в той час як іншими вченими і практиками досліджувався плазмотрон з циліндричним каналом.

Геометрія розрядного проміжку має суттєвий вплив на процеси, що відбуваються в плазмотроне, отже, і на його вихідні характеристики.

Канал вихідного електрода, що розширюється забезпечує більш стійке горіння дуги на осі розрядного проміжку, при цьому параметри зовнішнього потоку (швидкість, динамічний напір) змінюються плавно.

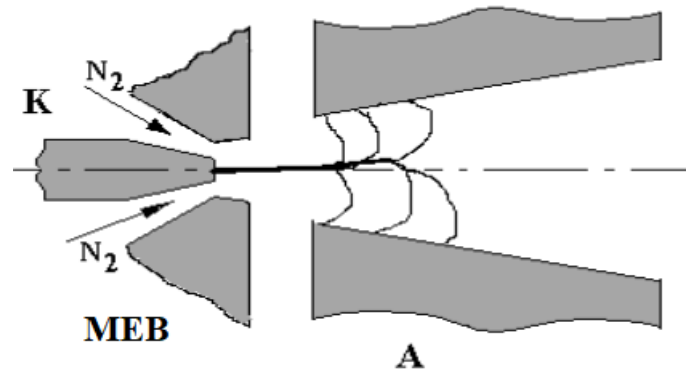


Рисунок 6 - Принципова схема плазмотрона з каналом вихідного електрода, що розширюється

Для проведення досліджень використовують плазмотрон (рисунок 7), елементами якого є водоохолоджуваний катод з вольфрамовим наконечником, МЕВ і вихідний електрод - анод.

Тиск потоку газу на виході з анода становить 1 атм., стабілізація дугового розряду здійснюється тангенціальною подачею газу.

У всіх експериментах плазмоутворюючим газом був азот. Режими переплавки необхідно вести таким чином, щоб підтримувати сталість дуги.



Рисунок 7 - Установка ПДП № 1

3.1.2 Установа ПДП №2 з вертикальним розташуванням плазмотрона

Лабораторна установка (рисунок 8) включає плазмотрон, заготовку, що переплавляють (діаметр 24 мм, довжина 700 мм), мідний водоохолоджуваний кристалізатор, механізм протягування заготовки, механізм подачі заготовки, а також механізм витягування злитка, комплексне використання яких дозволяє отримувати щільний злиток необхідного складу і дає можливість вести плавку безперервно, але при необхідності контролювати вміст азоту як на торці, так і в ванні розплавленого металу.



Рисунок 8 - Установка ПДП № 2

Принциповою відмінністю від класичної схеми є те, що плазма покриває як торець заготовки, що переплавляють, так і ванну рідкого металу в кристалізаторі. На торці електрода, що переплавляється повністю була відсутня поверхня десорбції, тобто $S_{ad} / S_d = 1$, а у ванні рідкого металу $S_{ad} / S = 0,77$ для забезпечення сприятливих умов азотування. На відміну від установки ПДП №1, де плазма торкається тільки електрода, що переплавляється, не забезпечуючи підтримку процесу азотування в ванні, що призводить до різкої зміни термодинамічних умов протікає процесів і може спровокувати утворення дефектів злитка, в тому числі поява бульбашок в металі, а також різке зниження концентрації азоту в металі. На установці ПДП №2 плазма покриває всю поверхню контакту розплавленого металу з плазмоутворюючим газом, забезпечуючи рівномірний розподіл азоту в злитку, відсутність дефектів.

3.1.3 Методика введення азоту на ПДП №1

Досліджуваний зразок поміщали в механізм, що підводить прутки до плазмотрону. Початкова відстань між плазмотроном і зразком, що переплавляють становить 10 мм.

Як тільки запалювалася чергова дуга, плазмотрон відразу ж віддаляли від зразка на довільну відстань (яке забезпечує стабільне горіння дуги), в якості плазмоутворюючого газу подавали чистий азот (99,9999%). Експерименти проводили при витраті плазмоутворюючого газу від 0,13 г / с до 0,35 г / с і потужності плазмотрона від 11 до 15 кВт. Плавку закінчували при повному розплавленні зразка.

Після закінчення експерименту метал витягували з мідної водоохолоджуваної підкладки з подальшим аналізом на вміст азоту методом екстракції в несучім газі на приладі "Лесо" ТС-600. Контроль хімічного складу отриманого металу проводили фотоелектричним спектральним

методом на спектрометрі Bruker Q4 Tasman. Перед визначенням хімічного складу зразка поверхню зачищали на абразивному колі.

Результати експериментів на установці ПДП №1 з горизонтальним розташуванням плазмотрона представлені в таблиці 2.

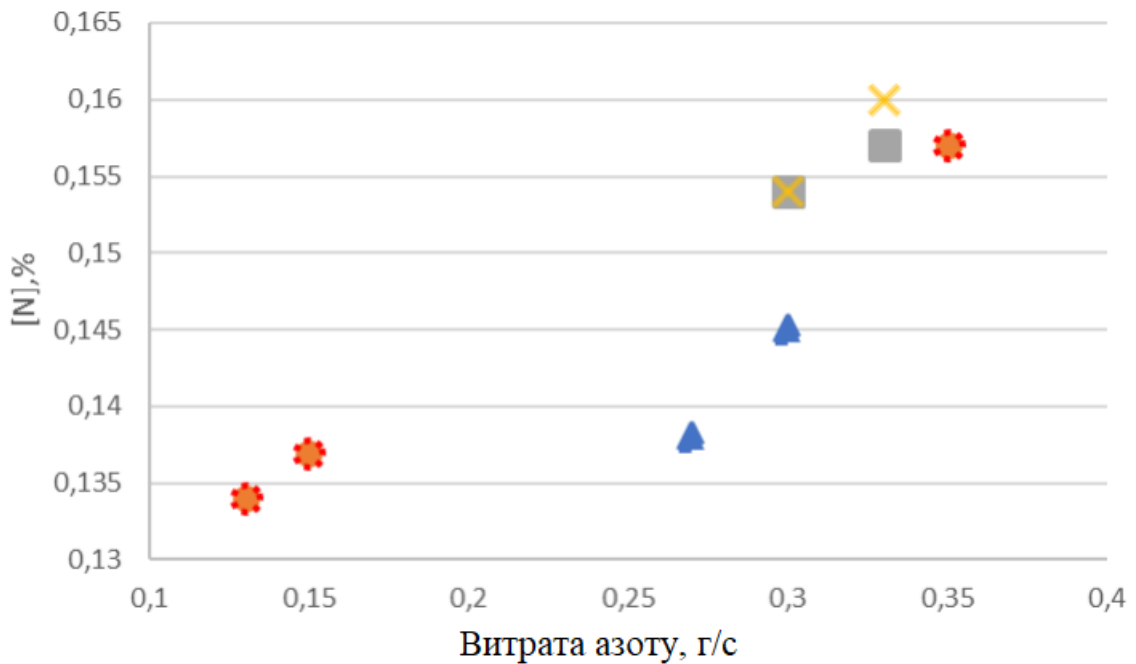
Таблиця 2 - Вміст азоту в металі при переплаву заготовки зі сталі марки 10X8HMBФБ при плавці на установці ПДП №1

Витрата азоту , г/с	Потужність плазмотрона	Сила струму, А Напруга, В	[N], %
0,13	13	180 70	0,134
0,3	11	150 70	0,145
0,15	13	180 70	0,137
0,3	5	220 70	0,154
0,3	14	200 70	0,154
0,27	1	150 70	0,138
0,33	15	220 70	0,160
0,35	13	180 70	0,157
0,35	14	200 70	0,157

Протягом проведення експериментів визначалися 2 технологічних параметра: витрата плазмоутворюючого газу- від 0,13 г / с до 0,35 г / с та потужність плазмотрона - від 11 кВт до 15 кВт з метою вивчення їх впливу на процес азотування.

Як видно з даних, представлених на рисунку 9 підвищення витрати плазмоутворюючого газу прямо пропорційно впливає на вміст азоту в злитку, що наплавляється. Це може бути обумовлено тим, збільшення витрати газу провокує підвищення швидкості потоку плазми.

В результаті проведеного аналізу вмісту азоту в процесі його введення на установці ПДП № 1 встановлено, що він змінюється з 0,0074 до 0,160 %.



Δ - P = 11 кВт, * - P = 13кВт, \square - P = 14кВт, x - P = 15кВт

Рисунок 9 - Залежність концентрації азоту в металі від витрати плазмоутворюючого газу

На деяких зразках, отриманих при переплаві заготовки на установці ПДП №1, з'явилися дефекти. Можливо, це було пов'язано з тим, що на торці заготовки, що переплавляють відбувається насичення металу азотом до «понадівноважних» вмістів для стандартних умов. Потрапляючи в лунку рідкого металу «понадівноважний» азот залишає розплав, викликаючи дефект у вигляді пор і бульбашок.

3.1.4 Методика введення азоту на ПДП №2

Досліджуваний зразок поміщали заздалегідь в підготовлений механізм підведення вихідної заготовки в зону переплавки. Початкова відстань між плазмотроном і зразком, що переплавляють становить 15 мм. Як тільки

запалювалася чергова дуга, плазмотрон відразу ж віддаляли від зразка на довільну відстань (яке забезпечує стабільне горіння дуги), в якості плазмоутворюючого газу подавали чистий азот (99,9999%). Експерименти проводили при витраті плазмоутворюючого газу від 0,15 г / с до 0,37 г / с, час переплавки від 15 до 180 с і потужності плазмотрона 12 і 14 кВт.

Плавку закінчували при повному розплавленні зразка. Готовий метал виходив шляхом витягування злитка за допомогою спеціального механізму. Після закінчення експерименту в готовому металі контролювали вміст азоту методом екстракції в несучій газі на приладі "Лесо" ТС600, крім того, контролювали вміст азоту на торці заготовки.

Маса газового зразка становила від 0,1 до 1 г в залежності від вмісту в ньому азоту (чим вище передбачувана концентрація азоту, тим менше зразок). Контроль хімічного складу отриманого металу проводили фотоелектричним спектральним методом на спектрометр Bruker Q4 Tasman. Перед визначенням хімічного складу зразка поверхню зачищали на абразивному колі.

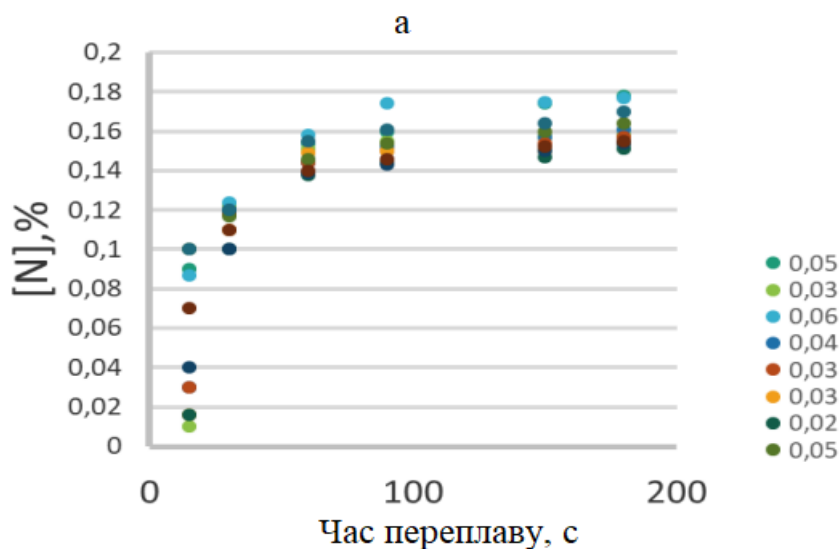
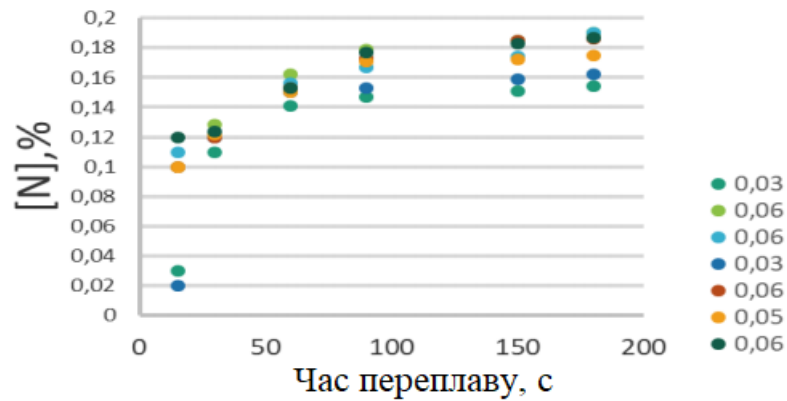
Для усунення дефектів, виявлених на установці ПДП №1, проблему постаралися вирішити наступним чином: установка була виконана так, щоб плазмова дуга закривала не тільки заготовку, що переплавляється, а й ванну металу, щоб підтримувати процес переплавки / азотування на всіх стадіях, тобто підтримувати умови засвоєння азоту розплавом. Основні результати проведених експериментів представлені в таблиці 3.

В ході експериментів потужність плазмотрона варіювали від 11 і 15 кВт, витрата азоту варіювали від 0,1 г / с до 0,37 г / с з метою аналізу впливу даних технологічних параметрів на перебіг процесу азотування.

Для підбору режиму легування сталі газоподібним азотом в агрегаті ПДП №2 було оцінено вплив часу перебування під струмом на вміст азоту в готовому металі (рисунок 10).

Таблиця 3 - Вміст азоту в металі при переплаву заготовівлі зі сталі марки 10X8HMBФБ при плавці на установці ПДП № 2

Витрата азоту, г/с	Вміст азоту в готовому металі $[N]_{Me}$, %	Вміст азоту в плівці на торці заготовки $[N]_3$, %
0,27	0,18	0,243
0,15	0,165	0,231
0,33	0,182	0,273
0,3	0,166	0,21
0,25	0,18	0,27
0,2	0,169	0,246
0,35	0,186	0,269
0,37	0,19	0,285
0,17	0,162	0,221



б

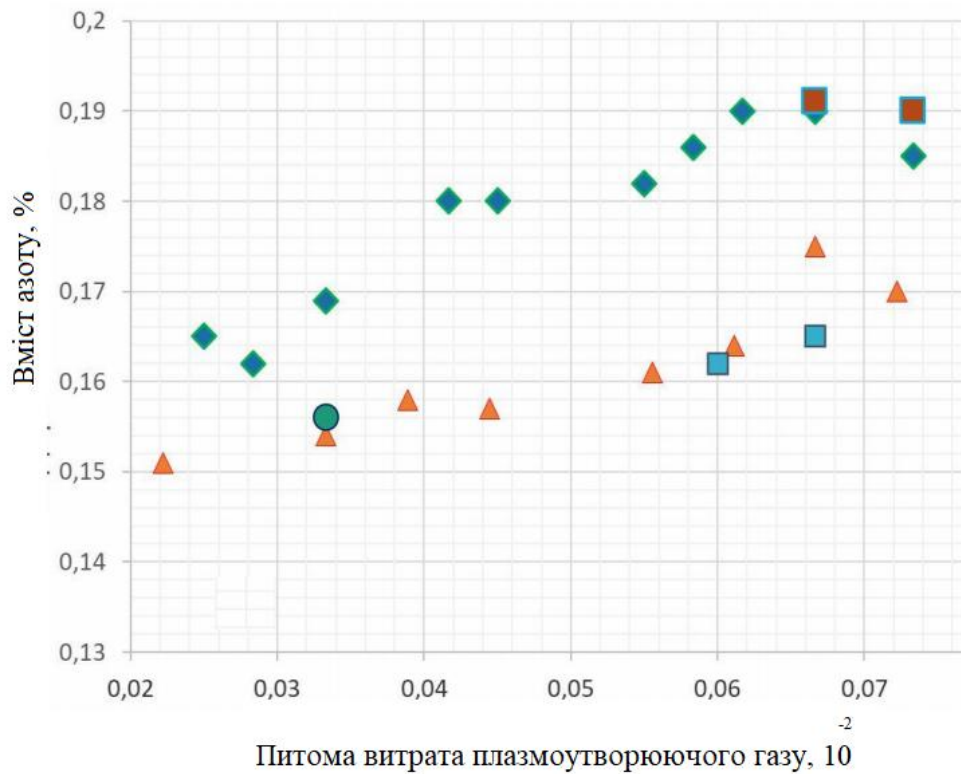
а - потужність плазмотрона 12 кВт, б - потужність плазмотрона 14 кВт
Рисунок 10 - Залежність концентрації азоту в металі від часу переплавки на установці ПДП №2

Як видно з експериментальних даних (рисунок 10), при збільшенні тривалості плавки кінцевий вміст азоту в металі зростає, при цьому дана тенденція властива як для експериментів із застосуванням плазмотрона потужністю 12кВт, так і 14 кВт. На початку проведення процесу переплавки на установці ПДП №2 з вертикальним розташуванням плазмотрона спостерігається збільшення вмісту азоту в металі з вихідної концентрації до 0,1 - 0,12%, що може бути пояснено великим значенням швидкості азотування при низьких вмістах азоту в металі, а в подальшому вміст азоту збільшується плавно, тобто швидкість процесу азотування знижується зі збільшенням вмісту азоту в сталі, що узгоджується з літературними даними.

Відзначено, що вміст азоту в злитку, що наплавляється в кінці переплавки збільшується до 0,190% (таблиця 3), що в 1,5 рази перевищує його рівноважну концентрацію в стандартних умовах.

На процес азотування крім часу переплавки впливає інший важливий технологічний параметр, вплив якого важливо оцінити для виявлення відповідної залежності, -питома витрата плазмоутворюючого газу, який також варіювався від експерименту до експерименту. Був проведений аналіз впливу питомої витрати плазмоутворюючого газу ($г / (с * Г_{Me})$) на вміст азоту в металі (рисунок 11).

Виходячи зі змін значень вмісту азоту в металі, що наплавляється залежно від контрольованого параметра, можна зробити висновок про прямопропорційний вплив величини питомої витрати плазмоутворюючого газу на вміст азоту в металі, що найімовірніше відбувається за рахунок зміни швидкості потоку плазми, тенденція зміни якої збігається з витратою плазмоутворюючого газу.

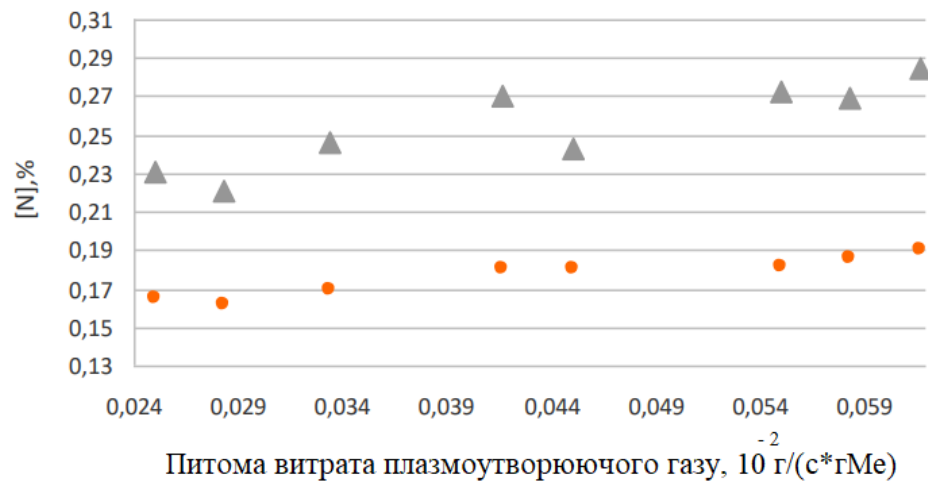


- - потужність плазмотрона 11кВт, Δ - потужність плазмотрона 12кВт,
 ○ - потужність плазмотрона 13кВт, ◇ - потужність плазмотрона 14кВт,
 ▪ - потужність плазмотрона 15кВт

Рисунок 11 – Залежність вмісту азоту в металі від питомої витрати плазмоутворюючого газу при різних потужностях плазмотрона

Установка ПДП №2 з вертикальним розташуванням плазмотрона була виконана таким чином, що плазмова дуга закривала заготовку, що переплавляється повністю. У ряді експериментів в півці на торці зразка, що переплавляється фіксувався вміст азоту.

Проведене порівняння вмісту азоту на торці заготовки, що переплавляється та в зливку, що наплавляється після закінчення процесу азотування показує, що вміст азоту в металі на торці заготовки, що переплавляється на 30 -50% перевищує вміст азоту в готовому металі (рисунок 12), що дозволяє припустити, що основне насичення відбувається саме на торці заготовки.



Δ - вміст азоту на торці електрода, що переплавляється, %,

o - вміст азоту в готовому металі електрода, що переплавляється, %,

Рисунок 12 - Залежність вмісту азоту в металі і на торці електрода, що переплавляється від питомої витрати плазموутворюючого газу (потужність плазмотрона 14кВт)

При подальшому відділенні крапель і надходження їх в ванну розплавленого металу їх склад досить швидко стабілізується.

Одним з факторів, який може впливати перевищення вмісту азоту в плівці на торці заготовки, що переплавляються над вмістом азоту в наплавляемому зливку, є температура плазموутворюючого газу в зоні контакту з металом.

Проаналізувавши експериментальні дані про значення вмісту азоту в металі при переплаві на ПДП № 2 відзначено, що середнє значення вмісту азоту на рівні 0,190 % відповідає загальному тиску системи рівному 1 атм і парціальному тиску атомарного азоту, рівному $0,19 \cdot 10^{-4}$ атм,

Згідно залежностям, отриманим при обробці результатів експериментів (рисунок 12), на першій стадії процесу азотування збільшення витрати плазموутворюючого газу також, як і на третій стадії процесу ПДП позитивно впливає на вміст азоту на торці заготовки, що переплавляють.

Результати хімічного аналізу металу заготовок, що переплавлялись і отриманих злитків, виплавлених методом ПДП з вмістом азоту в межах від 0,190 до 0,192%, з використанням фотоелектричного спектрального методу аналізу хімічного складу отриманих зразків на спектрометрі Bruker Q4 Tasman (таблиця 4) свідчить про те, що зміст основних легуючих елементів в металі відповідає заданому марочним складом.

Таблиця 4 – Фактичний склад сталі 10X8HMBBF

Хімісклад, %	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	W	P	S	V	Nb
Фактичний	0,1	0,34	0,92	8,3	0,8	0,72	0,68	≤0,01	≤0,01	0,44	0,39

Для контролю розподілу азоту по зливку був проведений аналіз азоту по товщині зразка (з кроком 100мм) на кожній товщині бралися 2 проби на різних відстанях від осі (таблиця 5).

Таблиця 5 – Розподіл азоту по висоті зразків

Товщина зразка, мм	[N], %	
	Зразок №1	Зразок №2
0	0,1900	0,1921
	0,1902	0,1922
100	0,1900	0,1923
	0,1901	0,1921
200	0,1900	0,1920
	0,1902	0,1921
300	0,1901	0,1920
	0,1900	00,1922

Згідно вищенаведеним даними вміст азоту в процесі його введення при ПДП збільшується з 0,0074 до 0,192%. Розподіл азоту за діаметром і висотою злитка спостерігався у всіх отриманих зразків.

В результаті аналізу вмісту азоту в металі по перетину злитка можна відзначити його рівномірний розподіл по висоті і діаметру злитка, що забезпечується режимом переплавки заготовки [27].

3.2 Основні споживачі та шляхи вдосконалення технології

Метод ПДП дуже ефективний для виробництва сталей з особливо високим вмістом азоту, прецизійних сплавів, ряду жароміцних сплавів і т. п. Особливо перспективний він для виробництва високоміцних марганцевих сталей.

Плазмова плавка є найбільш високопродуктивним процесом серед усіх існуючих способів спеціальної електрOMETалургії. Стосовно конкретних методів плавки є додаткові переваги, пов'язані зі специфікою цих процесів. Застосування плазмового нагріву в сталеплавильному виробництві розвивається за трьома основними напрямками:

- 1) плазмове плавлення сталей і сплавів в печах з керамічним тиглем (типу Лінде);
- 2) різні модифікації методу плазмово-дугового переплаву (ПДП) в печах з кристалізатором;
- 3) використання плазмового нагріву в комбінації з іншими способами нагрівання для підвищення технологічності і економічності існуючих методів виплавки сталі, наприклад індукційної плавки з плазмовим підігрівом.

Нині створено досить надійні конструкції плазмових печей і потужних плазмотронів (до 4 МВт), розроблені технологія легування сталей різного типу з азотом газової фази і технологія виплавки складнолегованих (зокрема, високохромистих) сталей з вмістом азоту $<0,025\%$, процесів розкислення і десульфурації.

Переплавні печі з кристалізатором можна умовно розділити на два класи: печі, що працюють при нормальному або підвищеному тиску, і установки, що працюють при низькому тиску. Перший спосіб називають методом плазмово-дугового переплаву, другий - методом вакуум-плазмового переплаву (ВПП). Обидва методи по своїм можливостям перспективні і технологічно ефективні. Методи плазмового переплаву дозволяють використовувати шлаки, варіювати в широких межах тиск і склад атмосфери,

незалежно регулювати потужність і швидкість переплаву, тобто забезпечують більш гнучке регулювання умов кристалізації і рафінування, ніж методи ВДП і ЕШП [24].

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі магістра була проведена наступна робота:

1. Розглянуто конструкцію плазмово-дугової печі з керамічним тиглем та плазмотрона та визначені наступні переваги:

- виключається забруднення металу небажаними домішками, наприклад вуглецем з графітованих електродів,

- плазмовий струмінь може складатися з будь-якої необхідної суміші газів, що дозволяє підтримувати в печі будь-яку атмосферу - окислювальну, відновлювальну або нейтральну;

- в плазмово-дугових печах можна досягти високих температур і легко їх регулювати, що є запорукою стабільності процесу.

2. Аналіз експериментальних даних показав, що азотування металу на установці ПДП з вертикальним розташуванням плазмотрона дозволяє досягти більш високого вмісту азоту в злитку.

3. Встановлено, що при переплаві заготовок на установці ПДП №2 збільшення тривалості плавки підвищує кінцевий вміст азоту в складнолегованій високохромистій сталі.

4. Аналіз показав, що на торці заготовки, що оплавляється перевищення вмісту азоту досягає 30-50% в порівнянні з злитком, що наплавляється, в зв'язку з підвищеною температурою, відповідним складом плазми.

5. Відзначено, що збільшення часу перепаковки сприяє підвищенню вмісту азоту в металі (ванні) при інших рівних умовах, що узгоджується з теоретичним матеріалом.

6. В результаті аналізу вмісту азоту в зразках при ПДП на установці з вертикальним розташуванням плазмотрона відзначено його рівномірний розподіл по висоті і діаметру зливка, що забезпечується режимом перепаковки заготовки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Цветков Ю. В., Николаев А. В. Плазменные процессы в составе энергометаллургического комплекса (некоторые проблемы металлургии будущего). Ресурсы. Технология. Экономика. 2006. № 2. С. 20–26; №3. С. 38–42.
2. Бакст В. Я. СпецэлектрOMETаллургия сталей и сплавов : конспект лекций. Мариуполь : ПГТУ, 2007. 90 с.
3. Металургія. Майбутнє галузі – ківш проблем? URL: <http://www.golos.com.ua/article/315388>.
4. Гудремон Э. А Специальные стали. Москва: Металлургия, 1966. 1275 с.
5. Гольдштейн М.И., Грачев С.В. , Векслер Ю.Г. Специальные стали 2-е изд., перераб. и доп. Москва: «МИСиС», 1999. 408 с.
6. Морозов А.Н. Водород и азот в стали. Москва: Металлургия, 1968. 280 с.
7. Гуляев А. П. Металловедение. Москва: Металлургия, 1986.544 с.
8. Патон Б. Е., Лакомский В. И., Торхов Г. Ф., Слышанкова В. А. Получение высокоазотистых сталей и их свойства // Проблемы спец. электрOMETаллургии. 1975. Вып. 1. С. 68 – 88.
9. Ригина Л Г, Васильев Я М., Дуб В.С., Колпишон Э.Ю., Афонасьев С Ю . Легирование стали азотом // ЭлектрOMETаллургия^ 2005, №2. С 14 – 21.
10. Влияние легирования азотом на упрочнение и стабильность аустенита стали типа X18N10.Капуткина Л.М., Медведев М.Г., Прокошкина В.Г. и др.//Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. № 7. С. 43 – 50.
11. Горобец В. Г., Гаврилова М. Н. Производство стали в дуговой печи : учеб. пособие для сред. проф. учеб. заведений. Москва : Металлургия, 1986. 204 с.
12. Каблуковский А.Ф. Производство стали и ферросплавов в электропечах : учеб. пособие для техникумов. Москва : Металлургия, 1991. 334 с.
13. Морозов А.Н. Современное производство стали в дуговых печах : учебное пособие для вузов. Москва : Металлургия, 1983. 183 с.

14. Морозов А.Н. Современное производство стали в дуговых печах : 2-е изд., перераб. и доп. Челябинск : Metallurgia, 1987. 174 с.
15. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия : учебник для вузов, 6-е изд., перераб. и доп. Москва : Академкнига, 2002. 768 с.
16. Бабаскин Ю. З., Шипицын С. Я., Афтандиянц Е. Г. Экономное легирование стали : АН УССР, Ин-т пробл. литья. Киев: Наук. думка, 1987. 183 с.
17. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы : издание 2-е, перераб. о доп. Москва : Metallurgia, 1969. 752 с.
18. Лакомский В.И. Плазменно-дуговой переплав : учебное пособие. Киев: Техника, 1974. 335с.
19. Фарнасов Г.А., Фридман А.Г., Каринский В.Н. Плазменная плавка : учебное пособие. Москва : Metallurgia, 1968. 180 с.
20. Плазменно-дуговой переплав металлов и сплавов / Б. Е. Патон, В. И. Лакомский, Д. А. Дудко, О. С. Забарилло // Автомат. сварка. – 1966. – № 8. С. 1—5.
21. Дембовский В. Плазменная металлургия : пер. с чешского, СНТЛ. Москва : Metallurgia. 1981. 280 с.
22. Ерохин А. А. Плазменно-дуговая плавка металлов и сплавов. – Москва: Наука, 1975. 188 с.
23. Чередниченко В. С., Аньшаков А. С., Кузьмин М. Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: НТГУ, 2008. –602 с.
24. Переплав расходоуемого плазмотрона / Б. Е. Патон, К. С. Ельцов, В. И. Лакомский и др. // Металлург. – 1974. – № 10. С. 9—12.
- 25 Симонян Л. М., Семин А. Е., Кочетов А.И. Теория и технология спецэлектрометаллургии : курс лекций. Москва : МИСиС, 2007. 180 с.
26. Клюев М. М. Плазменно-дуговой переплав : учебное пособие. Москва : Metallurgia, 1980. 255 с.

27. Шукина Л. Е. Исследование и разработка процесса легирования металла азотом в агрегатах специальной электрометаллургии с целью повышения качества стали: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». Москва. 2018
28. Енциклопедія по машинобудуванню XXL. URL:<https://mash-xxl.info/info/276973/>