

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Металургії

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему Розробка технології випалення  
конструкційної низьколегованої  
сталі

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1369-МЧМ-3

спеціальності 136 Металургія

(код і назва спеціальності)

спеціалізації \_\_\_\_\_

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Металургія торчих металів

(назва освітньої програми)

І.О. Тор

(ініціали та прізвище)

Керівник доцент і пед.н. доц. Мосейко Ю.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доцент і т.ч. доц. Волер Р.М.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)



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

Інженерний навчально-науковий інститут \_\_\_\_\_  
 Кафедра металургії  
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
 Спеціальність 136. Металургія  
(код та назва)  
 Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)  
 Освітня програма Металургія чорних металів

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри Кириленко О.Т.  
 «02» вересня 2020 року

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

Тор Ярослав Олександрович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

- 1 Тема роботи (проєкту) Розробка технології  
випадки конструкційної низьколегованої  
сталі
- керівник роботи Мосейко Юрій Вікторович и.пед.ч.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
- затверджені наказом ЗНУ від «02» новтня 2020 року № 1586-С
- 2 Строк подання студентом роботи 24 лютого 2020р
- 3 Вихідні дані до роботи патент, література, інструкції,  
періодичні видання, інтернет ресурси, винаходи
- 4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вибір технології випадки сталі, перемішування  
металу, аналіз електромагнітного перемішування
- 5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Схема електричної дугової печі, Індукційний електрод  
перемішування, пристрій для електромагнітного  
перемішування. Дугова ліч з двома подібними електродами



## 6 Консультанти розділів роботи

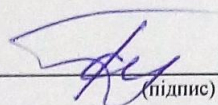
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Вступ	Мосейко Ю.В. доцент	02.09.20	02.09.20
Загальна част.	Мосейко Ю.В. доцент	17.09.20	17.09.20
Технологічна частина	Мосейко Ю.В. доцент	03.10.20	03.10.20
Спеціальна част.	Мосейко Ю.В. доцент	20.10.20	20.10.20
Висновки	Мосейко Ю.В. доцент	04.11.20	04.11.20

7 Дата видачі завдання 02 вересня 2020 р

## 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	Технологічна частина	03.10-19.10.20	
4	Спеціальна частина	20.10-03.11.20	
5	Висновки	04.11-20.11.20	

Студент

  
(підпис)С.О. Тор  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)

  
(підпис)Ю.В. Мосейко  
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

  
(підпис)Р.М. Волер  
(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Тор Я.О. Розробка технології виплавки конструкційної низьколегованої сталі.

Кваліфікаційна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 136 – Металургія, науковий керівник Ю.В. Мосейко. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут, кафедра металургії, 2020.

У роботі розглянуто призначення та характеристику конструкційної низьколегованої сталі, вплив легуючих елементів на властивості сталі. Обрано оптимальну технологічну схему виробництва сталі. Розглянуто роль перемішування розплаву металу в ванні дугових печей. Проведено аналіз електромагнітних способів перемішування та впливу положення електродів, що підводять струм на течії розплаву в ванні ДППТ.

Ключові слова: СТАЛЬ, ДУГОВА ПІЧ, РОЗКИСЛЕННЯ, ШИХТА,  
ВІДНОВЛЕННЯ, ПОДОВИЙ ЕЛЕКТРОД,  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПЕРЕМІШУВАННЯ

## ANNOTATION

Tor Ya.A. Development of technology for smelting structural low-alloy steel.

Qualification work for obtaining a higher education master's degree in specialty 136 - Metallurgy, supervisor Yu.V. Moseiko. Zaporizhzhya National University. Engineering Research Institute, Department of Metallurgy, 2020.

The paper considers the purpose and characteristics of structural low-alloy steel, the influence of alloying elements on the properties of steel. The optimal technological scheme of steel production was selected. The role of stirring the metal melt in the arc furnace bath is considered. The analysis of electromagnetic mixing methods and the influence of the position of the electrodes supplying current on the melt flow in the DPPT bath is carried out.

Keywords: STEEL, ARC FURNACE, OXIDATION, CHARGE,  
RESTORATION, HOLE ELECTRODE,  
ELECTROMAGNETIC STIRRING

### **АННОТАЦИЯ**

Тор Я.А. Разработка технологии выплавки конструкционной низколегированной стали.

Квалификационная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 136 - Metallurgy, научный руководитель Ю.В. Мосейко. Запорожский национальный университет. Инженерный учебно-научный институт, кафедра металлургии, 2020.

В работе рассмотрены назначение и характеристику конструкционной низколегированной стали, влияние легирующих элементов на свойства стали. Избрано оптимальную технологическую схему производства стали. Рассмотрены роль перемешивания расплава металла в ванне дуговых печей. Проведен анализ электромагнитных способов перемешивания и влияния положения электродов, подводящих ток на течение расплава в ванне ДППТ.

Ключевые слова: СТАЛЬ, ДУГОВАЯ ПЕЧЬ, РАСКИСЛЕНИЕ, ШИХТА,  
ВОССТАНОВЛЕНИЕ, ПОДОВЫЙ ЭЛЕКТРОД,  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 67 с., 1 табл., 28 рис., 32 джерела.

### СТАЛЬ, ВУГЛЕЦЬ, ДУГОВА ПІЧ, РОЗКИСЛЕННЯ, ШИХТА, ВІДНОВЛЕННЯ, РОЗЛИВКА

Тема кваліфікаційної роботи магістра: «Розробка технології виплавки конструкційної низьколегованої сталі».

У розділі «Загальна частина» розглянуто призначення та хімічний склад сталі марки, вплив легуючих елементів на властивості сталі та характеристика низьколегованих сталей.

В розділі «Технологічна частина» розглянуто способи виплавки сталі та обрано оптимальний, запропоновано апаратурно-технологічну схему виплавки конструкційної низьколегованої сталі.

В «Спеціальній частині» визначалася роль перемішування розплаву металу в ванні дугових печей, розглянуто способи електромагнітного перемішування розплаву та вплив положення електродів на течії розплаву.

## ЗМІСТ

Вступ	9
1 Загальна частина	12
1.1 Характеристика низьколегованих сталей	12
1.2 Призначення та хімічний склад сталі марки 10ХСНД	15
1.3 Вплив легуючих елементів на властивості сталі 10ХСНД	18
2 Технологічна частина	26
2.1 Вибір технології виплавки сталі	26
2.1.1 Виплавка в кисневому конвертері	26
2.1.2 Виплавка в дуговій печі	29
2.2 Апаратурно-технологічна схема виплавки сталі 10ХСНД	31
2.2.1 Виплавка в дуговій печі методом переплаву	32
2.2.2 Підготовка печі до завалки	34
2.2.3 Підготовка шихтових матеріалів і завалення шихти	35
2.2.4 Період плавлення	37
2.2.5 Окислювальний період	38
2.2.6 Випуск плавки	39
2.2.7 Позапічна обробка сталі в агрегаті «піч-ківш»	40
2.2.8 Порядок введення розкислювачів та легуючих матеріалів	42
3 Спеціальна частина	44
3.1 Роль перемішування розплаву металу в ванні дугових печей	44
3.1.1 Вплив перемішування розплаву металу на технологію виплавки стали в дуговій печі постійного струму	45
3.2 Огляд існуючих способів перемішування металу в ванні дугової печі постійного струму	48
3.3 Аналіз електромагнітних способів перемішування металу в ванні дугової печі	51
3.3.1 Індукційний спосіб перемішування розплаву металу	51
3.3.2 Кондукційний спосіб перемішування розплаву металу	55

	8
3.3.3 Електровіхревий спосіб перемішування розплаву металу	58
3.4 Вплив положення електродів, що підводять струм на течії розплаву в ванні ДППТ	61
Висновки	64
Перелік джерел посилань	65



## ВСТУП

**Актуальність проблеми.** Чорна металургія відіграє значну роль у світовій економіці, впливаючи на провідні галузі промисловості. Практично всі держави націлені на розвиток виробництва даної галузі як одного з перспективних секторів економіки.

Чорна металургія є фундаментом для розвитку ряду провідних галузей світової економіки: оборонної промисловості, транспортного й важкого машинобудування, енергетики, будівництва (у тому числі авіаційного й судноплавного).

Поряд з цим, український сектор чорної металургії в техніко-технологічному відношенні залишається одним з найвідсталіших у світі. Застарілі технології виробництва сталі не дозволяють досягти максимальної ефективності через відставання від кращих світових виробничих практик, надмірного споживання енергії й інших ресурсів, формуванню шкідливих відходів і ін. Зацікавленість потужних приватних бізнес-груп у розвитку металургійної галузі сприяла залученню інвестиційних ресурсів для підтримки інфраструктурної системи на нинішньому рівні. Разом з тим, подальше відкладання модернізації виробництва може привести до втрати ринків збуту – як внутрішніх, так і зовнішніх – внаслідок погіршення конкурентних переваг українських виробників.

Конструкційні сталі повинні мати високу конструктивну міцність, забезпечувати тривалу й надійну роботу конструкції в умовах експлуатації. Тому особливість вимог до конструкційних матеріалів, полягає в необхідності забезпечення комплексу високих механічних властивостей, а не однієї якої-небудь характеристики.

Матеріали, що йдуть на виготовлення конструктивних елементів, деталей машин і механізмів, повинні володіти високою міцністю й пластичністю, добре пручатися ударним навантаженням, володіючи запасом в'язкості. При знакозмінних навантаженнях конструкційні матеріали повинні

мати високий опір втоми, а при терті — опором зношування. У багатьох випадках необхідний опір корозії. Враховуючи, що в деталях завжди є дефекти, що є концентраторами напруг, конструкційні матеріали повинні мати високий опір крихкому руйнуванню й поширенню тріщин.

Крім високої надійності й конструктивної міцності, конструкційні матеріали повинні мати високі технологічні властивості — гарні ливарні властивості, оброблюваність тиском, різанням, гарну зварюваність. Конструкційні матеріали повинні бути дешеві й не повинні містити дефіцитних легуючих елементів.

Із усіх матеріалів, які застосовують на даний час і прогнозованих у майбутньому, тільки сталь дозволяє одержувати комбінацію високих механічних характеристик і гарну технологічність при порівняно невисокій вартості. Тому сталь є основним і найпоширенішим конструкційним матеріалом.

У металургійному виробництві в даний час в різні періоди виплавки металу використовується процес перемішування рідкої ванни для отримання якісного кінцевого продукту і зниження енергоємності виробництва. У зв'язку з цим обов'язковим елементом конструкції є наявність пристроїв, що забезпечують якісне перемішування металу, яке можна досягти за допомогою продувки розплаву металу газами або при використанні електромагнітних способів перемішування.

Перемішування розплаву металу за допомогою електровіхревих течій (ЕВТ) найбільший інтерес представляє з точки зору інтенсифікації технологічних періодів плавки. Воно переслідує три основні завдання: прискорення металургійних процесів (рафінування, розчинення, дифузії); механізацію перемішування ванни і скачування шлаку; вирівнювання температури і хімічного складу металу за обсягом ванни в періоди, коли власний рух металу слабо і затягує плавку.

Технологія перемішування металу в ДППТ за рахунок збудження ЕВТ успішно застосовується за кордоном (ВАТ «Бобруйський машзавод,

республіка Білорусь; АТ« Транснаціонального Компанія «Казхром», Казахстан; «Aluminium alloys of Estonia AS», Естонія) так і в Україні (ТОВ «Струмтех, ЛТД»). При її використанні в ДППТ встановлюють один осьової графітований електрод (катод) і не менше двох подових електродів (ПЕ). Найчастіше цю технологію використовують в ДППТ місткістю до 25 т, які знаходять все більше застосування в «малій» металургії машинобудівного і ливарного виробництва при виплавці сталі, чавуну, феросплавів, кольорових металів і сплавів, переробці шлаків, при цьому печі працюють за класичним циклом.

**Мета роботи:** розробка технології виплавки конструкційної сталі та аналіз ефективності перемішування металу в дуговій печі.

**Завдання роботи:** дослідити фізико-хімічні властивості сталі; визначити вплив перемішування ванни металу на інтенсифікацію процесу.

**Наукова новизна роботи:** теоретично обґрунтовано можливість керування інтенсивністю і напрямком течії металу в ванні ДППТ за рахунок зміни співвідношення струмів і зсуву фаз між пульсуючими струмами, що проходять через подові електроди. Рекомендований вибір характеристик пульсуючих струмів, що протікають через подові електроди для підвищення ефективності перемішування розплаву у ванні ДППТ.



## 1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

### 1.1 Характеристика низьколегованих сталей

**Низьколеговані сталі** містять до 2,5 % легуючих елементів, використовують як прості конструкційні (машинобудівні й будівельні), так і теплотривкі. Вони відрізняються по експлуатаційним властивостям, та чутливістю до процесу зварювання.

Властивості низьколегованих конструкційних сталей у відомих межах регулюють зміною вмісту вуглецю й легуючих елементів. Зі збільшенням вмісту вуглецю зварюваність сталі погіршується через підвищення ймовірності утворення гарячих і холодних тріщин. Підвищення ймовірності утворення гарячих тріщин при збільшенні вмісту вуглецю обумовлене схильністю вуглецю до ліквіації, а холодних тріщин — тим, що вуглець знижує температуру мартенситного перетворення й сприяє формуванню мало пластичного (двійникового) мартенситу. Об'ємні зміни (збільшення об'єму) при перетворенні аустеніту в мартенсит з підвищенням вмісту вуглецю зростають. Це призводить до збільшення внутрішньої напруги.

У зв'язку з відзначеним у зварених конструкціях застосовують в основному низьковуглецеві сталі підвищеної міцності, які містять до 0,23 % вуглецю і належать до перлітного класу. Вони мають достатню міцність і відносно гарну зварюваність. Низьколеговані сталі поставляють в основному в гарячекатаному стані або після нормалізації.

Останнім часом найбільшого застосування набули високоміцні низьколеговані сталі з мартенситною або бейнітною структурою (14X2ГМР, 14ХМНДФР, 10ХСНД і ін.), які володіють високими механічними властивостями та мають задовільну зварюваність.

Комбінація подібних властивостей досягається за рахунок комплексного багатоконпонентного легування сталі при незначному вмісті

вуглецю. Малий вміст вуглецю забезпечує одержання металу зі структурою рейкового мартенситу або бейніту [6].

Сталі підвищеної міцності, а особливо високоміцні, завдяки відносно великому співвідношенню  $\sigma_T/\sigma_B$ , чутливі до концентраторів напруг. Це необхідно враховувати при розробці конструкцій і режимів зварювання, домагаючись плавних переходів у зоні зварних з'єднань.

Низьколеговані теплотривкі сталі відносяться до основних перлітного класу. Вони характеризуються достатньою жароміцністю, жаростійкістю, запасом пластичності й стабільністю структури при температурах до 600°C. Підвищена міцність сталі в області високих температур досягається за рахунок зміцнення легуючими елементами  $\alpha$ -твердого розчину заліза й формування стійких карбідів, не схильних до коагуляції.

Теплотривкі сталі зміцнюються термообробкою. Однак, як правило, сталі використовують або у відпаленому стані, або після нормалізації й високого відпустку (при температурі 650-750 °C) в залежності від марки сталі).

Особливо доцільне застосування високоміцних низьколегованих сталей на базі марганцю, кремнію й хрому. Економічна ефективність заміни вуглецевих сталей легованими очевидна. Додаткові витрати на феросплави завжди окупаються підвищенням надійності й довговічності та відповідним зниженням металоємності деталей.

Сучасні досягнення електрметалургії та киснево-конвертерних процесів, нові прогресивні методи позапічної обробки сталі, що включають вакуумну та інжекційну металургії, дозволяють одержувати високоякісні особливо чисті й модифіковані сталі з високим рівнем заданих властивостей.

Сталі з такими властивостями користуються стійким попитом у ряді галузей, у тому числі будівництві та машинобудуванні. До таких сталей відноситься сталь марки 10ХСНД, яка є низьколегованою та характеризується гарною зварюваністю. Однак наявність в ній легуючих елементів обумовлює можливість появи гартівних структур у зоні термічного

впливу, що при несприятливій комбінації других факторів може викликати зменшення стійкості її проти холодних тріщин. Легуючі елементи можуть знизити також опір швів гарячим тріщинам, збільшить або, навпаки, зменшити внаслідок перегріву й схильність до крихкого руйнування металу в зоні термічного впливу та у шві. Особливі труднощі виникають при зварюванні термічно поліпшених сталей, які знеміцнюються в різних ділянках зони термічного впливу.

У з'єднанні в більшості низьколегованих сталей ударна в'язкість шва металу та зони термічного впливу поблизу межі сплавки в ділянках перегріву й твердо-рідкого стану при кімнатній температурі в стані після зварювання або після відпуску звичайно задовольняє вимогам відповідних технічних умов. При більш низьких температурах ударна в'язкість цих ділянок часто низька. Тому вибір технології електрошлакового зварювання й наступної термообробки багато в чому визначається умовами експлуатації конструкції й стійкістю низьколегованої сталі й металу шва у зварному з'єднанні проти крихкого руйнування.

Існує ряд можливостей для одержання з'єднань з високими властивостями. Вони полягають у виборі матеріалів з високою стійкістю проти перегріву при електрошлаковому зварюванні, раціональної термообробки, режимів і технологічних прийомів зварювання. До основних завдань варто віднести оцінку опірності крихкому руйнуванню металу шва сталі, що зварюється, у зоні термічного впливу та визначенні конкретних конструкцій і умов їх експлуатації, раціональних методів підвищення властивостей з'єднань.

Легування сталі впливає на її стійкість проти перегріву при електрошлаковому зварюванні. При раціональному легуванні сталь може виявитися настільки високою, що вимоги по ударній в'язкості металу поблизу межі сплавлення задовольняються вже після високого відпуску, без застосування поліпшуючої високотемпературної термічної обробки - нормалізації [7].



Постійна інтенсифікація умов експлуатації машин, агрегатів і будівельних конструкцій ставить перед металургами досить складну проблему створення нових економічних сталей масового сортаменту. Такі сталі повинні мати комплекс високих споживчих властивостей: міцність й пластичність в широкому інтервалі температур, мінімальну температуру, поріг крихкості, в тому числі міцність при статичних і динамічних навантаженнях. При цьому передбачається вирішення декількох завдань – забезпечення надійної роботи металоконструкцій в екстремальних умовах та зниження їх металоємності, або й те, і інше в комплексі. У всіх випадках необхідно забезпечити мінімальні витрати в металургійному переділі, навіть незважаючи на безсумнівний економічний ефект у споживача.

## **1.2 Призначення та хімічний склад сталі марки 10ХСНД**

Особливі умови роботи мостових конструкцій, схильних до вібраційних навантажень, вимагають вживання сталі малочутливої до концентрації напруги, не схильної до старіння після наклепання і що має досить низьку температуру переходу в крихкий стан. При виборі сталі для зварних мостів до цих умов додається вимога гарної зварюваності і достатньої в'язкості металу біля зварного шва.

Сталь 10ХСНД відноситься до класу конструкційних низьколегованих хромонікелевих сталей з міддю (рис. 1) [8]. Вона не схильна до відпускнуї крихкості, а значить зварні шви з даної марки не схильні до розтріскування, тому дана сталь широко застосовується в зварних конструкціях.

Її використовують для виготовлення елементів зварних конструкцій і різних деталей, до яких пред'являються вимоги підвищеної міцності і корозійної стійкості з обмеженням маси; прокату, призначеного для виготовлення мостових конструкцій звичайного зварного виконання; елементів різних зварних конструкцій, що несуть; деталей трубопровідної арматури після загартовування і відпуску; в якості основного шару при

виготовленні гарячекатаних двошарових корозійностійких листів, тому вона є достатньо затребуваною та необхідною.

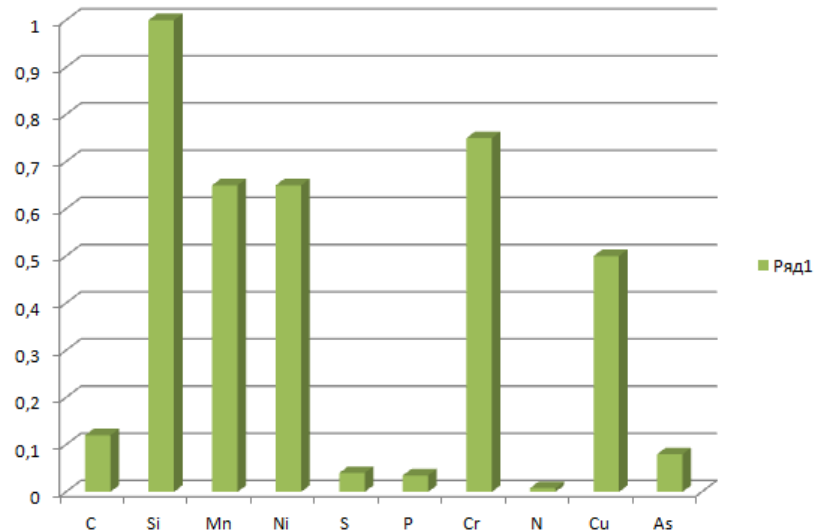


Рисунок 1 - Хімічний склад сталі 10ХСНД

Сталь 10ХСНД використовується для виготовлення як елементів зварних конструкцій, що несуть, так і для деталей спецтехніки (ковшів). В наш час сталевий прокат досяг дуже широкого поширення. Найбільш популярний та затребуваний металопродукат - сталевий лист, виготовлений методом гарячої прокатки. Сталевий лист застосовується в будівництві для виготовлення металокопункцій, в машинобудуванні, як продукція для нафтових платформ, що працюють в умовах Арктики, виготовлення казанів, а також як суднобудівельна, у тому числі для танкерів.

До окремої категорії виділяють лист низьколегований, він застосовується в різних сферах будівництва, в якості сировина як для зварних, так і для будь-яких інших конструкцій з металу. Лист 10ХСНД є незамінним і яскраво вираженим представником листового металопродукату. Хімічний склад сталі 10ХСНД додає цій сталі особливу міцність і робить незамінним в металокопункціях з підвищеними вимогами, широко використовується в районах з постійно низькими температурами.

У будівництві листовий прокат застосовується при виготовленні

зварних балок. Зварні балки - це на сьогоднішній день оптимальне рішення, якщо через конструктивні особливості об'єкту будівництва повинна застосовуватися балка, яка не катається заводами виробниками.

Сталі марок 10ХСНД і 15ХСНД мають меншу межу текучості, ніж інші цієї групи, але вони мають високі характеристики пластичності та в'язкості, що вельми важливо при роботі в умовах дії динамічних і знакозмінних навантажень. Сталь 10ХСНД має високі характеристики ударної в'язкості, що дозволяє їй чинити опір крихкому руйнуванню. Тому конструкції з цієї сталі можуть працювати при температурі до  $-70^{\circ}\text{C}$ .

Таким чином, сталь 10ХСНД є найбільш перспективною для будівництва елементів конструкцій мостів, до яких пред'являються вимоги підвищеної міцності, корозійної стійкості, незначної чутливості до концентраторів напруги. Крім того, дана сталь має нижчу вартість в порівнянні з іншими, що є позитивним моментом при обґрунтуванні вибору матеріалу для виготовлення металевих конструкцій. Конструкції із сталі 10ХСНД можуть експлуатуватися при температурах від  $-70$  до  $+450^{\circ}\text{C}$ .

Умови постачання:

- сортовий прокат, у тому числі фасонний: ГОСТ 19282-73, ГОСТ 2590-2006, ГОСТ 2591-2006, ГОСТ 8239-89, ГОСТ 8240-97, ГОСТ 6713-91, ГОСТ 535-2005, ГОСТ 5521-93, ГОСТ 8509-93, ГОСТ 8510-86;

- лист товстий: ГОСТ 19282-73, ГОСТ 19903-74, ГОСТ 5521-93, ГОСТ 6713-91;

- лист тонкий: ГОСТ 17066-94, ГОСТ 19903-74, ГОСТ 19904-90, ГОСТ 5521-93;

- смуга ГОСТ 19281-89, ГОСТ 82-70, ГОСТ 103-2006, ГОСТ 6713-91, ГОСТ 14637-89, ГОСТ 19282-73, ГОСТ 5521-93;

- поковки та ковані заготовки: ГОСТ 1133-71;

- труби ОСТУ 14-21-77 [9].



### 1.3 Вплив легуючих елементів на властивості сталі 10ХСНД

Сталь являє собою складний сплав, до складу якого поруч із основними елементами - залізом і вуглецем, входять постійні й випадкові домішки. До постійних домішок відносять марганець, кремній і алюміній, які вводяться в сталь при розкисненні (у киплячій сталі вміст кремнію й алюмінію дуже невеликий), а також сірку, фосфор, кисень, азот і водень, присутність яких обумовлено неможливістю повного їхнього видалення при масовому виробництві сталі в мартенівських печах і кисневих конвертерах. Випадкові домішки хром, нікель, мідь, миш'як і ін. попадають в сталь з шихтових матеріалів. При необхідності проводять процес легування сталі, підвищуючи концентрацію тих або інших елементів з метою зміни будови й властивостей сталі в заданому напрямку. Навіть незначна зміна вмісту вуглецю, домішок або легуючих елементів впливає на механічні й технологічні характеристики сталі.

*Вуглець* має визначальний вплив на властивості сталі. У гарячекатаному стані вуглецеві конструкційні сталі мають складатися з двох фаз: фериту та цементиту (рис. 2). Кількість цементиту знаходиться в прямій залежності від вмісту вуглецю в сталі.

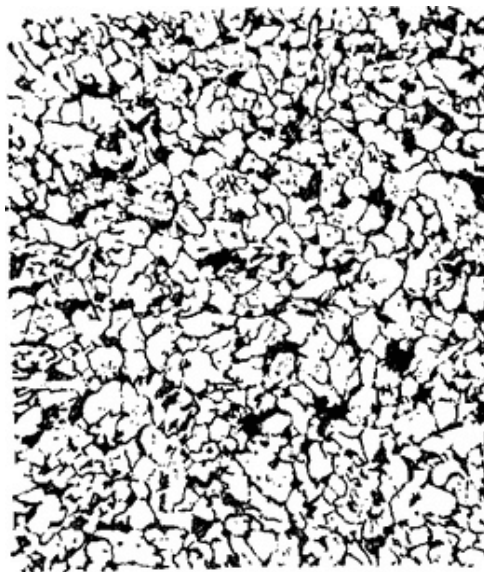


Рисунок 2 - Ферито-перлітна структура сталі (x100)

Збільшення в структурі конструкційної сталі кількості цементиту (а отже, і перліту) викликає підвищення її твердості НВ і міцності  $\sigma_B$  при одночасному зниженні характеристик пластичності  $\delta$ ,  $\psi$  і в'язкості КСУ (рис. 3). Криві, наведені на рисунку, відносяться до горячекатаної сталі з ферито-перлітною структурою.

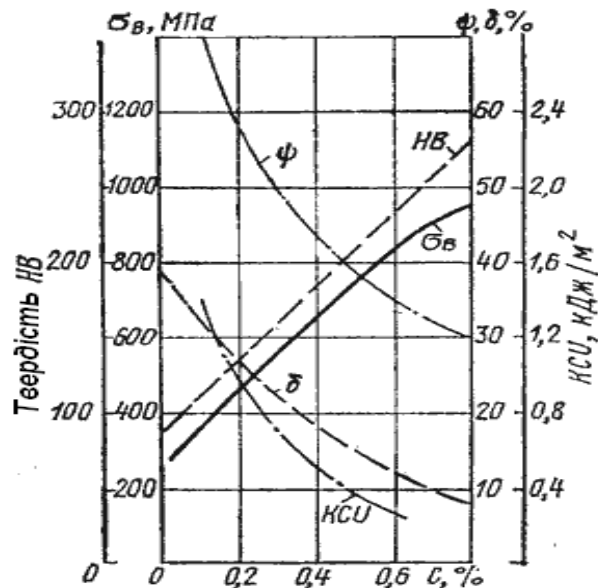


Рисунок 3 - Вплив концентрації вуглецю на механічні властивості сталі

У зоні термічного впливу зварювання можуть утворитися менш рівноважні структури сталі (тросит, бейніт, мартенсит). Твердість загартованої сталі особливо різко збільшується з вмістом вуглецю в ній більше 0,15 - 0,20 % [10].

Якщо твердість у зоні термічного впливу перевищує твердість основного металу більш ніж на 20 – 30 %, то значно зростає небезпека утворення холодних тріщин, знижується ударна в'язкість, підвищується неоднорідність по міцності звареного з'єднання. Тому сталі з підвищеним вмістом вуглецю (більше 0,25%) необхідно зварювати, попередньо підігріваючи ділянки металу в зоні термічного впливу й контролюючи погонну енергію зварювання, а зварене з'єднання потрібно термічно обробляти.

Вуглець погіршує й деякі інші технологічні властивості сталі,

наприклад, здатність до деформування в гарячому й особливо холодному станах. При збільшенні його концентрації підвищується поріг холодноламкості й зменшується значення ударної в'язкості при температурах вище порога холодноламкості (рис. 4).

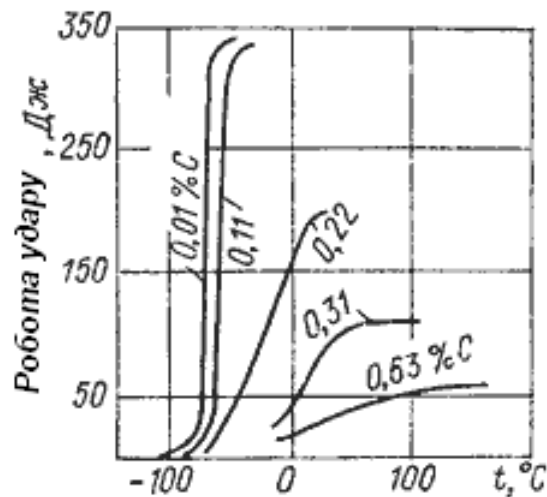


Рисунок 4 - Вплив концентрації вуглецю на холодноламкість сталі

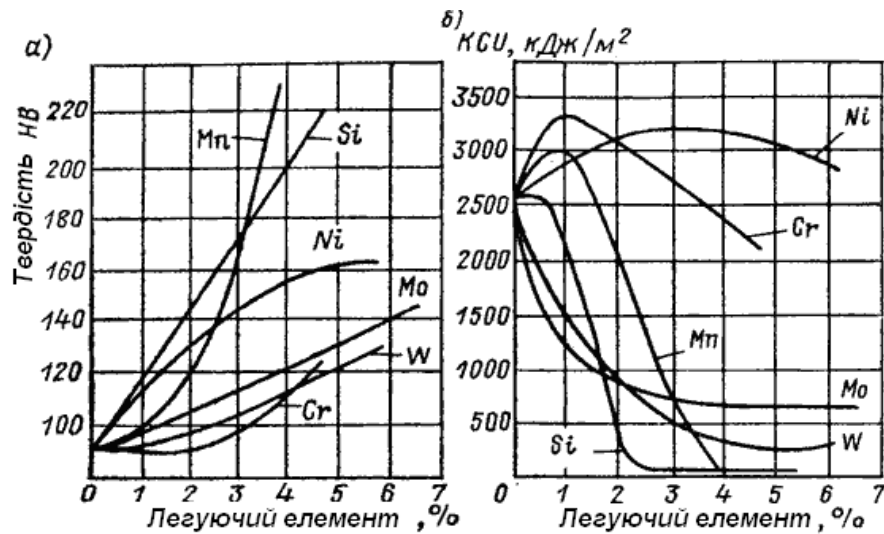
У вуглецевих і низьколегованих суднокорпусних сталях вміст вуглецю не перевищує 0,22 %, що забезпечує необхідний рівень міцності властивостей в об'єднанні з високими значеннями пластичності й в'язкості.

*Марганець* вводять до сталі при виплавці для її розкислення, а також для зменшення шкідливого впливу сірки. Зазвичай вміст марганцю в сталі більший, ніж цього вимагає технологія плавки, і тому певна його частка розчиняється у фериті й цементиті. Заміщуючи в  $\alpha$ -твердому розчині частину атомів заліза, марганець викликає істотне зміцнення фериту (рис. 5, а). При вмісті більше 1,5% марганець поруч із інтенсивним підвищенням міцності спостерігається різке зниження ударної в'язкості (рис. 5, б) і характеристик пластичності фериту.

У суднобудівній сталі при високих значеннях відношення вмісту марганцю до вмісту вуглецю забезпечується підвищення загального рівня ударної в'язкості при температурах в'язкого руйнування та зниження



температури переходу в крихкий стан.



а - на твердість, б - на ударну в'язкість

Рисунок 5 - Вплив легуючих елементів на властивості фериту

Потрібно, однак, враховувати, що занадто високий вміст марганцю може привести до утворення бейнітної структури при охолодженні сталі після прокатки. Це, у свою чергу, негативно позначиться на пластичності й в'язкості сталі. Тому вміст марганцю звичайно обмежують 1,4 - 1,6%.

*Кремній*, подібно марганцю, використовується як ефективний розкислювач сталі. У сплавах на основі заліза він не утворює власних карбідів і тому повністю розчиняється у фериті (частково кремній виявляється в сталі у вигляді силікатних включень). Кремній зміцнює ферит, однак при концентраціях, які перевищують 0,5 %, негативно впливає на його пластичність і в'язкість (рис. 6). Він також знижує здатність сталі до деформування в холодному стані. Збільшення концентрації кремнію понад 1 % веде до різкого підвищення порога холодноламкості (рис. 6).

Марганець і кремній є найважливішими компонентами сучасних суднокорпусних сталей підвищеної міцності.

*Нікель* вводять як легуючий елемент у сталі підвищеної міцності, який повинні зберігати на досить високому рівні характеристики пластичності, в'язкості, опору крихкому руйнуванню при низьких температурах, в корозійних середовищах. Він ефективно знижує температуру переходу в  $T_{50} > 0^{\circ}\text{C}$  крихкий стан, причому на відміну від інших елементів забезпечує цей позитивний вплив при широкому діапазоні концентрацій (рис. 6).

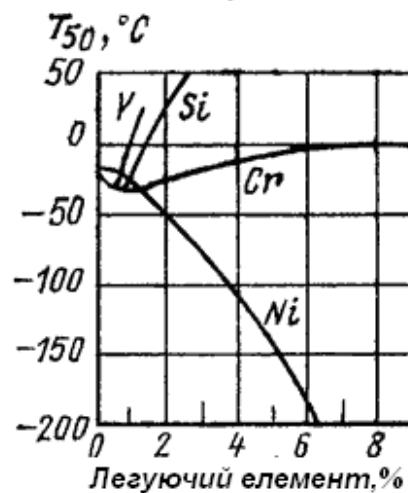


Рисунок 6 - Вплив легуючих елементів на поріг холодноламкості

*Хром і молібден* входять до складу низьковуглецевих сталей, які зміцнюють за механізмом вторинного твердіння (за рахунок виділення в  $\alpha$ -розчину високодисперсних карбідів). Раціональний вміст елементів визначають, виходячи з необхідності збереження достатньої пластичності, в'язкості й зварюваності сталі підвищеної міцності (рис. 5, 6).

*Мідь* збільшує міцність сталі завдяки зміцненню фериту, в процесі твердіння. Вона також сприяє супротиву корозії й зниженню критичної температури крихкості.

*Ніобій і ванадій* також можуть викликати дисперсійне твердіння сталі. При введенні 0,05% ніобію та 0,1% ванадію утворюються високо дисперсійні карбіди -  $\text{NbC}$  і  $\text{VC}$ . Це зміцнення реалізується або при виконанні контрольованої прокатки, або після термічної обробки.

Фосфор є шкідливою домішкою у сталі. Розчиняючись у фериті, він збільшує міцність сталі, але зменшує її пластичність і розвиток тріщин, підвищує поріг холодноламкості (рис. 7). Зміна вмісту фосфору на 0,01% веде до зміни температури переходу в крихкий стан на 20 - 25 °С, тому цей елемент викликає холодноламкість сталі. Вміст фосфору в сталях суворо обмежений та не повинен перевищувати 0,04 %. Однак у локальних мікро об'ємах його концентрація може бути вище, тому що він розподіляється не рівномірно, а в більшій мері накопичується по границях зерен. Сучасні методи виплавки сталі не забезпечують повного видалення фосфору, у зв'язку із чим рекомендується використовувати шихту з мінімальним його вмістом.

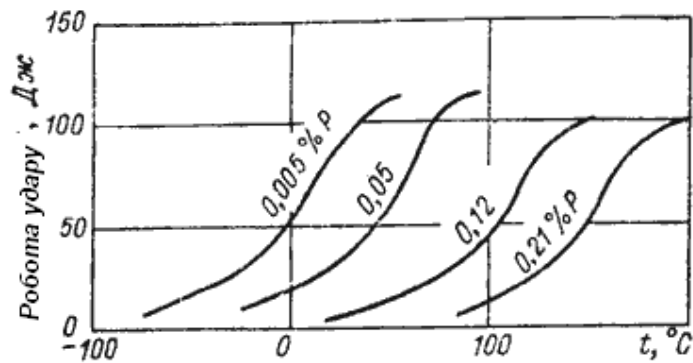


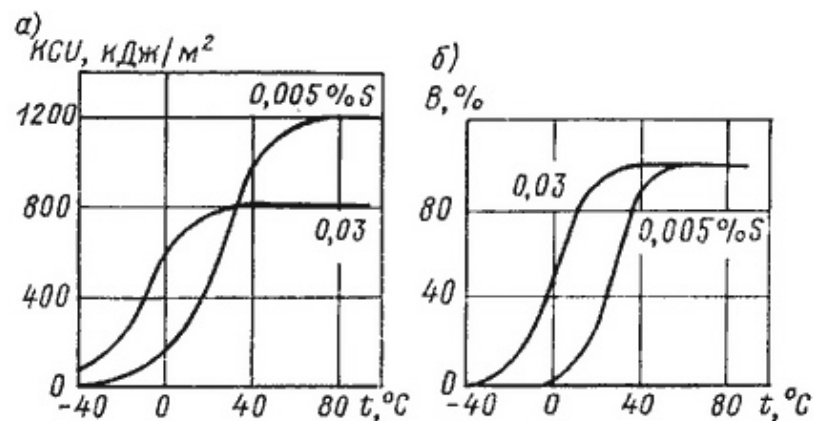
Рисунок 7 - Вплив фосфору на поріг холодноламкості сталі (0,2% С; 1,0% Мн).

Сірка надходить в сталь з шихтовими матеріалами (чавун, руда) при виплавці. Вона розчинена в рідкому металі, а при кристалізації виділяється у вигляді сульфідів заліза FeS, що входить до складу евтектики. Евтектична реакція протікає при порівняно низькій температурі (988 °С). Легкоплавка й крихка евтектика, розташована, як правило, по границях зерен, погіршує технологічні характеристики сталі при гарячій обробці тиском: нагрівання до температури початку деформування (1150 - 1200°С) викликає оплавлення евтектичних ділянок, а подальше деформування веде до утворення надривів і тріщин. Це явище зветься червоноламкість. Негативний вплив сірки на технологічну пластичність сталі зменшується при введенні марганцю, який

утворює тугоплавкий (температура плавлення  $1620^{\circ}\text{C}$ ) сульфід  $\text{MnS}$ . При прокатуванні включення  $\text{MnS}$  витягаються, набуваючи пластинчасту форму.

Однак пластинчасті, орієнтовані в напрямку прокатки включення підсилюють анізотропію механічних властивостей: характеристики пластичності та ударна в'язкість гарячекатаної сталі в напрямку прокатки значно вище, ніж у поперечному напрямку. Сірчисті включення пластинчастої форми, будучи концентраторами напруг, також різко знижують роботу поширення тріщини. Для сфероїдизації сульфідних включень в наш час проводять модифікування рідкої сталі силікокальцієм, цирконієм або церієм.

На відміну від інших шкідливих домішок сірка спочатку підвищує, а потім знижує (при більш високому об'ємі змісту  $\text{MnS}$ ) поріг холодноламкості (рис. 8).



а - на ударну в'язкість; б - на волокнистість у зламі,  
в - частка волокна в зламі, %

Рисунок 8 - Вплив сірки на поріг холодноламкості сталі

Сірка погіршує зварюваність і корозійну стійкість сталі. У сталях вміст сірки не повинен перевищувати 0,04 %.

Кисень, азот і водень містяться в сталі в дуже невеликих кількостях. Нижче наведено процентний вміст цих газів у сталі різних способів виробництва (табл.1):

Таблиця 1 - Вміст газів в сталі різних способів виробництва

Спосіб виробництва	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Електрична піч	0,002 - 0,004	0,007 - 0,010	0,0004 - 0,0006
Мартенівська піч	0,005 - 0,008	0,004 - 0,006	0,0003 - 0,0007
Кисневий конвертер	0,005 - 0,008	0,002 - 0,005	0,0001 - 0,0003

Однак і при цих концентраціях вони можуть надавати помітний вплив на механічні й технологічні властивості сталі. Це пов'язано з тим, що навіть низький вміст цих елементів значно перевищує їхню рівноважну розчинність в  $\alpha$ -залізі при кімнатній температурі. Тому після прокатки утворюється перенасичений ферит. Відповідно знижується опір сталі крихкому руйнуванню, підвищується поріг холодноламкості.

Крім того, як відзначалося раніше, азот і в меншій мірі кисень викликають деформаційне старіння сталі. Водень може привести до утворення в катаних заготовках флокенів. Метал, який має флокени, непридатний для промислового використання. При зварюванні водень викликає утворення холодних тріщин в основному й наплавленому металах. Кисень і азот, крім твердого розчину в  $\alpha$ -залізі, може утворювати із присутніми в сталі елементами хімічні сполуки - оксиди FeO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і нітриди Fe<sub>4</sub>N. Ці неметалічні включення погіршують деформованість сталі в холодному стані, збільшують схильність до крихкого руйнування. В останні роки з метою зменшення концентрації шкідливих домішок у сталях удосконалена металургійна технологія їх виробництва. Сталь, виплавляється в конвертерах та дугових печах, піддають обробці в ковші синтетичними шлаками й рідкоземельними металами; застосовують продувку розплаву аргоном, вакуумування, регульовану кристалізацію при безперервному розливанні; сталі найвищої якості одержують із додатковим рафінуючим (як звичайно електрошлаковим) переплавом [11].



## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Вибір технології виплавки сталі

Дану марку сталі можна виплавити наступними способами:

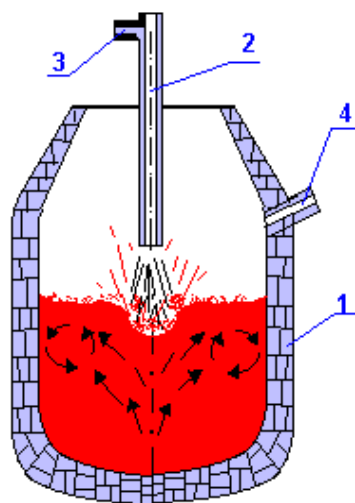
- киснево-конвертерним способом із застосуванням рідкого чавуну;
- переплавою легованих відходів з окисненням в ДСП («переплавка з киснем»).

Одна з відмінних особливостей конвертерного процесу полягає в його високій інтенсивності: періодичність плавки зазвичай складає менше 40 - 45 хвилин при масі продукції 100 - 350 т. Проте недолік даного процесу - неможливість використання великої кількості скрапу в шихті.

#### 2.1.1 Виплавка в кисневому конвертері

При киснево-конвертерному переділі застосовуються різні варіанти дугтя. В основному використовується спосіб продувки технічно чистим киснем зверху.

Пристрій кисневого конвертера 1 з продувкою зверху показано на рис. 9.



1 - конвертер, 2 - фурма, 3 - патрубок, 4 - лійка

Рисунок 9 - Кисневий конвертер

Кисневе дуття подається через водоохолоджувальну (через патрубок) фурму, що знаходиться над рівнем металу на відстані 300 - 800 мм. Для підйому і опускання фурми передбачено електропривод. Технічно чистий кисень (97 - 99%) подається під тиском 1-1,25 МН/м<sup>2</sup> (10 - 12 атм.) в кількості 2 - 2,5 м<sup>3</sup>/т металу на 1 хв. Велика частина сучасних конвертерів має ємність (масу плавки) понад 100 т, найбільші 250 - 300 т. Тривалість плавки і них становить 45 - 60 хв. Випуск сталі здійснюється через лютку. Кисневі конвертери футеровані основними вогнетривкими матеріалами - хромомagneзітом і т.п. Це дає можливість використовувати для ошлакування і видалення з металу сірки і фосфору основний флюс - вапно. Тому для виплавки сталі використовується передільний чавун марок М1, М2, М3. Перед заливкою чавуну в конвертер завантажуються вапно (4 - 10% від маси металу в залежності від вмісту в ньому сірки і фосфору). Під час продування внаслідок механічної дії струменя кисню відбувається перемішування металеві ванни. В області вдування кисню розвивається температура до 3000°С. від конвертера з повітряним дуттям вже з самого початку продувки відбувається окислення вуглецю, кремнію та інших домішок як безпосередньо киснем дуття, так закисом заліза. У кисневому конвертері вже на початку плавки утворюється добре нагрітий активний основний шлак з необхідним вмістом вапна СаО; відбувається видалення сірки і фосфору з утворенням в шлаку. Після досягнення заданого вмісту вуглецю продування припиняється, випускається і розкислюється сталь.

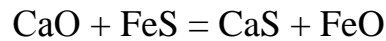
У кисневих конвертерах успішно освоюється і виробництво ряду марок легованих сталей. Перевагою такого способу є "універсальність" щодо вихідних матеріалів: можливість виплавки якісної сталі з чавунів різного хімічного складу.

При продувці кисень взаємодіє з залізом чавуну та з домішками по всьому об'єму рідкого металу, окислюючи їх:



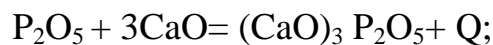
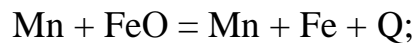
Утворений закис заліза взаємодіє з домішками чавуну та окислює їх, відновлюючись до заліза. Окис вуглецю, що виділяється допалюється в атмосфері:  $\text{C} + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}_2$ .

Окиси кремнію, марганцю, фосфору на поверхні металу взаємодіють друг з другом, з флюсом та закисом заліза і переходять в шлак. В шлак переходить і сірка:



В результаті концентрація вуглецю, кремнію та марганцю в металі знижується та до кінця продувки вміст цих елементів в розплаві відповідає їх кількості в сталі.

Реакції окислення кремнію, марганцю, фосфору та заліза екзотермічні, внаслідок чого температура рідкого металу в конвертері безперервно підвищується. Процес протікає дуже інтенсивно та супроводжується виділенням диму з полум'я:



Вище зазначені реакції протікають в конвертері з кисневим дуттям одночасно, причому остання реакція сприяє кращому перемішуванню нижніх шарів металу. Тривалість продувки 10 - 25 хв. Сумарна тривалість циклу 20 - 40 хвилин.

Конвертерний процес є самим продуктивним способом виробництва сталі. Недоліком даного виробництва є велика кількість пилоутворення, обумовлене сильним окисленням та випаровування заліза: угар металу складає 6 - 9%, що значно більше ніж при інших способах виробництва сталі.

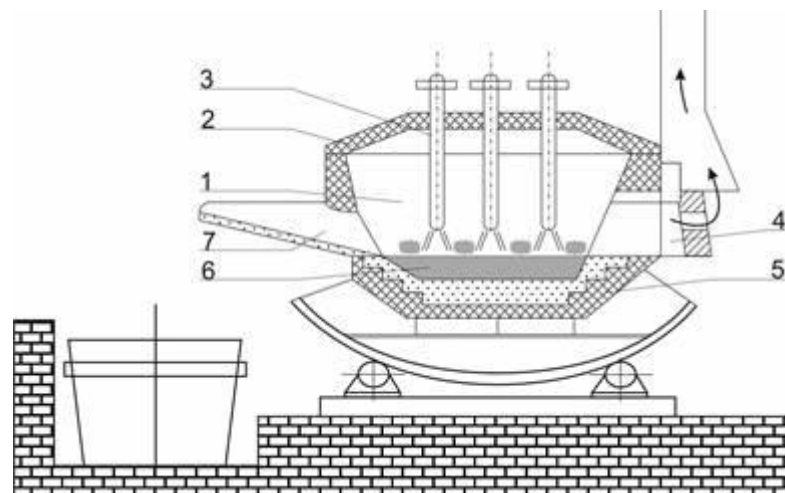
Це потребує обов'язкового будівництва при конвертерах коштовних пилоочисних установок [12].

### 2.1.2 Виплавка в дуговій печі

Ці печі мають переваги в порівнянні з іншими плавильними агрегатами. В електропечах можна швидко нагрівати, плавити і точно регулювати температуру металу, створювати окислювальну, відновну, нейтральну атмосферу - вакуум. У цих печах можна виплавляти сталь та сплави будь-якого складу, більш повно розкислювати метал з утворенням мінімальної кількості неметалічних включень - продуктів розкислення.

Тому електропечі використовують для виплавки конструкційних сталей відповідального призначення, високолегованих, інструментальних, корозійностійких (нержавіючих) та інших спеціальних сталей і сплавів.

В дуговій електросталеплавильній печі в якості джерела теплоти використовують електричну дугу, яка виникає між електродами і металевою шихтою. Дугова електросталеплавильна піч (рис. 10) живиться трифазним



- 1 - робочий простір печі, 2 - з'ємне склепіння, 3 - електрод, 4 - робоче вікно,  
5 - вогнетривка цегла, 6 - рідкий метал, 7 - лютка для випуску металу

Рисунок 10 - Схема електричної дугової печі

змінним струмом і має три циліндричних електрода, виготовлених з графітованої маси. Електричний струм від трансформатора гнучкими кабелями і мідними шинами підводиться до електродотримача, а через них до електродів.

Між електродами і металевою шихтою виникає електрична дуга, електроенергія перетворюється в теплоту, яка передається металу і шлаку випромінюванням. Робоча напруга 180 - 600 В, сила струму 1 - 10 кА. Під час роботи печі довжина дуги регулюється автоматично шляхом вертикального переміщення електродів.

Піч має сталевий зварний кожух. Кожух печі зсередини футерований теплоізоляційною і вогнетривкою цеглою, який може бути основним (магнезитовий, магнезитохромітовий) або кислим (динасовий). Подина печі набивається з вогнетривкої маси. У стінках печі є робоче вікно для управління ходом плавки і лютка для випуску готової сталі по жолобу в ківш.

Піч завантажують при знятому склепінні. Піч може нахилитися убік завантажувального вікна і лютки. Ємність дугових електропечей 0,5 - 400 т. У металургійних цехах зазвичай використовують дугові електропечі з основною футерівкою, а в ливарних цехах - з кислою.

В основній дуговій печі застосовують два види технології плавки: на шихті з легованих відходів (методом переплаву) і на вуглецевій шихті (з окисненням домішок).

Плавку на шихті з легованих відходів з низьким вмістом фосфору проводять без окислення домішок. Шихта для такої плавки, крім зниженого вмісту фосфору, повинна мати менше, ніж в виплавленій сталі, кількість марганцю і кремнію. По суті це переплав. Однак у процесі плавки за рахунок кисню деякі домішки (алюмінію, титану, кремнію, марганцю, хрому) окислюються. Крім того, шихта може містити оксиди. Тому після розплавлення шихти метал розкислюють, видаляють сірку, наводять основний шлак, при необхідності насичують вуглецем і доводять метал до



заданого хімічного складу. При цьому оксиди легуючих елементів відновлюються і переходять зі шлаку в метал. Таким способом плавки одержують леговані сталі з відходів машинобудівних заводів.

Після закінчення завалки шихти електроди опускають вниз і включають струм; шихта під електродами плавиться, метал накопичується на подині печі. Під час плавлення шихти починається окислювальний період плавки: за рахунок кисню повітря, окислів шихти і окалини окислюється кремній, марганець, вуглець, залізо. Разом з окисом кальцію, що міститься у вапні, оксиди цих елементів утворюють основний залізистий шлак, що сприяє видаленню фосфору з металу.

Після нагрівання металу і шлаку до 1500 - 1540 °С в піч завантажують руду і вапно. Кисень, що міститься в руді інтенсивно окислює вуглець і викликає кипіння ванни рідкого металу, за рахунок пухирців окису вуглецю що виділяються. Шлак спінюється, рівень його підвищується; для випуску шлаку піч нахиляють убік робочого вікна і він стікає в шлакову чашу.

Кипіння металу прискорює нагрівання ванни, видалення з металу газів, неметалевих включень, сприяє видаленню фосфору. У результаті вміст фосфору в металі знижується до 0,01% і одночасно за рахунок утворення окису вуглецю при кипінні зменшується і вміст вуглецю. Коли вміст вуглецю стає менше заданого на 0,1%, кипіння припиняють і повністю видаляють з печі шлак. Цим закінчується окислювальний період плавки [13].

Відновлювальний період плавки включає розкислення металу, видалення сірки і доведення хімічного складу до заданого. Після видалення окисного шлаку в піч подають феромарганець в кількості, що забезпечує заданий вміст марганцю у сталі.

## **2.2 Апаратурно-технологічна схема виплавки сталі 10ХСНД**

Виплавку сталі марки 10ХСНД необхідно проводити в трифазній дуговій сталеплавильній 100-тонній печі змінного струму переплавом

легованих відходів з окисленням газоподібним киснем («переплавка з киснем») [14]. Позапічну обробку сталі - в агрегаті «піч-ківш». Розливання проводити на МБЛЗ.

Технологічний схема виплавки сталі марки 10ХСНД виглядає таким чином: ДСП-100 → LF (піч-ківш) → МБЛЗ (рис. 11).

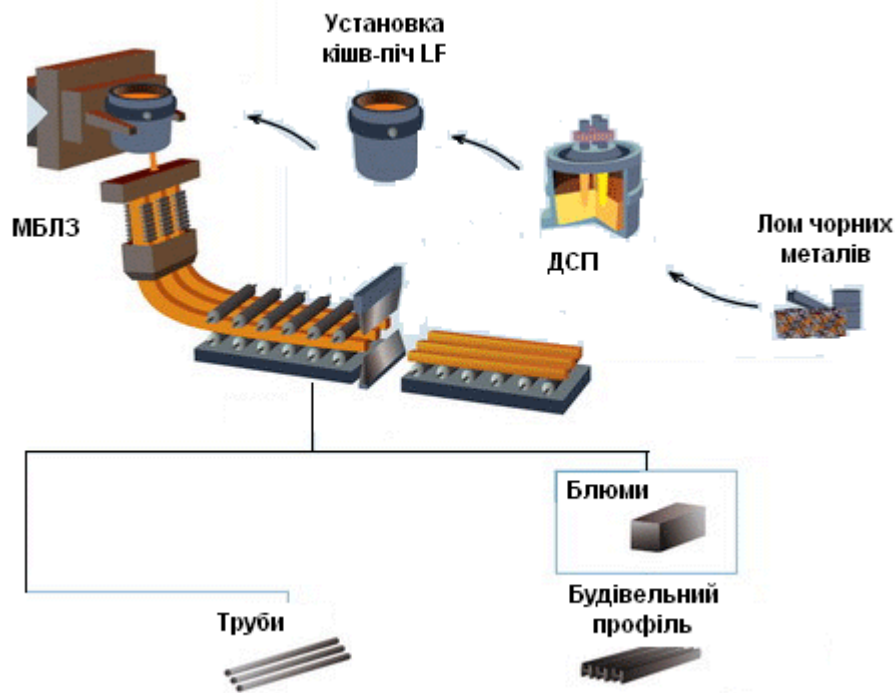


Рисунок 11 - Апаратурно-технологічна схема виплавки сталі марки 10ХСНД

### 2.2.1 Виплавка в дуговій печі методом переплаву

При переплавці легованих відходів сталі необхідно найраціональніше використовувати легуючі елементи, що містяться в них. Такі елементи, як алюміній і титан, якщо не прийняти спеціальних заходів, можуть повністю окислюватися і перейти в шлак ще в період плавлення. Інші (хром, ванадій, вольфрам і ін.) окислюються і в окислювальний період. З метою максимального вилучення їх з шихти плавку доцільно вести без окислення,

тобто без присадок руди і з обмеженням окислювальних процесів в період плавлення. Такий метод ведення плавки називають переплавною легованих відходів.

При переплавці легованих відходів вуглець і фосфор практично не окислюються, тому вміст фосфору в шихті не повинен перевищувати допустимих меж в готовій сталі, а вміст вуглецю зважаючи на можливе науглецювання від електродів і від шлаку повинен бути на 0,05 - 0,10 % нижче, ніж в готовій сталі (але не менше 0,08 - 0,1 %). Тому до складу шихти, окрім власних відходів або відходів близьких по складу сталі, вводять м'яке залізо або низьковуглецеві відходи з низьким вмістом фосфору.

Доцільніше з точки зору економії, використовувати менш дорогі низьковуглецеві відходи, а не заготівку з м'якого заліза. При необхідності використання ферохрому і феровольфраму їх вводять в завалку, причому феровольфрам дають під електроди, а ферохром на укуси.

З метою раннього утворення шлаку для захисту металу від окислювальної дії атмосфери і науглецювання електродами шлакоутворюючі матеріали додають в завалку, а після початку утворення колодязів їх закидають під електроди.

Відсутність кипіння металу виключає можливість видалення газів з металів. Тому при виплавці сталі методом переплавки легованих відходів якості шихтових матеріалів приділяється особлива увага - вони мають бути сухими, лом не іржавим, шлак утворюючі і легуючі добавки мають бути прожарені. Але навіть при дотриманні цих заходів обережності при виплавці методом переплавки в металі вміст азоту збільшується. Запобігти насиченню металу азотом і навіть зменшити його вміст в порівнянні з початковим можна введенням в завалку замість вапна - вапняку в кількості 1,0 - 1,5 % від маси шихти. Двоокис вуглецю, що утворюється при його дисоціації, виділяється у вигляді бульбашок і дегазує метал. Для цієї ж мети присаджують до 2 % вапняку в процесі плавлення шихти.

Навіть за відсутності окислювального періоду частина легуючих елементів окислюється киснем з повітря в період плавлення і двоокисом вуглецю вапняку, тому при виплавці сталі з високим вмістом хрому, вольфраму або ванадію шлак не викачують. При необхідності науглецьовування, отримання густого шлаку з високим вмістом MgO або при підвищеному вмісті марганцю скачування шлаку, що утворився в період плавлення при виплавці сталі цих марок, можна проводити лише після розкислення.

### **2.2.2 Підготовка печі до завалки**

Виплавка металу повинна проводитися в печі з гарним або задовільним станом подини, укосів, стін, склепіння, еркера, випускного отвору, арматури, що охолоджує, механічного і електричного устаткування. Після випуску металу в ківш необхідно відразу ж провести очищення укосів і подини від залишків шлаку і металу, після чого приступити до заправки укосів і подини заправними матеріалами.

В якості заправних матеріалів слід застосовувати периклазовий порошок фракцією до 5 мм і хромитопериклазову крупу – 0 -10 мм. При значних пошкодженнях укосів допускається їх заправка сумішшю периклазового порошку і рідкого скла в співвідношенні 10:1. При значних пошкодженнях подини шар заправки слід покрити шаром вапна.

Після заправки печі необхідно оглянути стан випускного отвору (еркер) і прийняти заходи до приведення його в належний стан, а також оглянути стан стін, склепіння і, при необхідності, надалі провести їх ремонт.

Поріг робочого вікна заправляють хромитопериклазової крупкою, що отримується при дробленні хромитопериклазової цегли і магнезитового порошку.

Перед черговою плавкою слід очистити шлакову чашу, зануливши її вміст в спеціальний вагон для вивозу відходів, потім на дно чаші насипати невеликий шар вапняку.

### **2.2.3 Підготовка шихтових матеріалів і завалення шихти**

Шихта має бути складена з розрахунку отримання після розплавлення розрахункового вмісту вуглецю на 0,20 - 0,40 % вище за верхню межу заданого хімічного складу.

Вміст в металошихті елементів, що не видаляються в процесі виплавки металу, не повинен перевищувати значень заданого хімічного складу. Завалка шихтових матеріалів проводиться за допомогою корзин, типа грейфера. Завалку шихти рекомендується проводити в один прийом, проте за наявності більшої частини легковагового лому доводиться проводити підвалювання після розплавлення частини завантаженої шихти.

Для забезпечення необхідної щільності завалки слід дотримуватися наступних пропорцій завантаження лому:

- дрібна шихта (стружка) - 25 %;
- середня шихта - 40 %;
- крупний лом - 35 %.

У робочому просторі печі маловуглецеві відходи необхідно розташовувати ближче до укосів печі, а вуглецевмісні добавки присаджувати на подину або в «колодязі» під електроди в першій половині періоду плавлення.

Якість і підготовка матеріалів, які використовуються для виплавки сталі, повинні відповідати вимогам нормативно-технічної документації.

Забороняється застосовувати відходи невідомого хімічного складу, а також промаслену стружку.

Феросплави.

Матеріали, які застосовуються для легування і розкислювання сталі,

повинні відповідати вимогам нормативно-технічної документації. При виплавці сталі використовуємо:

- ферохром, феросиліцій - в шматках і порошку;
- феромарганець - у вигляді чушок і порошку.

Феросплави з шихтового прольоту повинні подаватися на робочий майданчик в спеціальних коробках або мульдах. Феросплави, призначені для присадки в рідкий метал, мають бути прожарені в нагрівальній печі до червоності протягом 20 хвилин.

Не підлягають прожарюванню кусковий алюміній, відходи алюмінієвого виробництва, а також порошки алюмінію, феросиліцію, коксу. Тривалість часу від кінця прожарювання до використання феросплавів не повинна перевищувати 8 годин. Порошки, які призначені для розкислювання шлаку, повинні мати фракцію:

- феросиліцій і алюміній - не більше 2 мм;
- кокс - не більше 1 мм.

Всі феросплави, які присаджують в піч (або ківш) мають бути заздалегідь зважені і підготовлені до присадки: укладені в мульду. На робочому майданчику в печі повинні зберігатися феросплави, необхідні для виплавки заданої марки сталі. Зберігати біля печі легуючі елементи не призначені для виплавки заданої марки сталі, забороняється.

Окислювачі.

Газоподібний кисень, для продування металу в печі, повинен містити не більше 0,8 г/м<sup>3</sup> вологи.

Шлакоутворюючі матеріали.

Шлакоутворюючі матеріали повинні подаватися на робочий майданчик окремо в контейнерах, коробках і мульдах. Мають бути прожарені в нагрівальних печах до червоності і мати розмір шматків не більше 150 мм. Вапно для використання в електрпечах повинне мати розмір шматків 20 - 80 мм. Вапно поступає з печей вапняково - доломітової ділянки в закритих контейнерах, які виключають попадання вологи з атмосферних.



Вапно застосовується лише свіже обпалена - не пізніше трьох діб після вивантаження з обпалювальної печі. Придатне до застосування вапно має бути використане протягом 12 годин з моменту поставки до цеху і містити не менше 85 % окису кальцію, не більше 0,08 - сірки,  $\text{CO}_2$  - не більше 4 %,  $\text{H}_2\text{O}$  - не більше 1,5 %.

Вапно, що розклатося, і вапно з вмістом вологи більше 3% застосовувати при виплавці сталі забороняється.

Плавииковий шпат (флюорит) у вигляді шматків або окатків, масова доля фториду кальцію не менше 75 %.

Аргон використовується вищого або першого сорту. Тиск аргону в мережі має бути від 0,5 до 1,5 МПа.

#### **2.2.4 Період плавлення**

Після завалки шихти перед включенням печі сталевар спільно з черговим персоналом служби механіка і електрика зобов'язаний оглянути і перевірити справні дії систем водяного охолодження, відведення газів з печі, механічного і електричного устаткування, про що робиться відповідна відмітка в плавильній карті.

Перед вмиканням печі необхідно перевірити стан (наявність сколів, тріщин, якість ніпельних гнізд) і довжину електродів. Електроди мають бути без видимих пошкоджень, а їх довжина - забезпечувати проведення плавки без нарощування. При необхідності заміну електродів або їх нарощування проводять перед включенням печі після завалки шихти або на початку періоду плавлення.

Розплавлення шихти слід вести відповідно до електричних режимів, розроблених для кожної печі.

Поріг вікна завалки слід запровадити в першій половині плавлення.

Випускний отвір має бути закладений в перші 20 хвилин плавлення.

Плавлення шихтових матеріалів слід проводити на максимальній

потужності трансформатора.

Для прискорення плавлення, з метою уникнення перегріву рідкого металу, зриву подини або поломки електродів, шихту періодично зіштовхують з укосів в рідкий метал або в середину ванни, піднімаючи електроди, коли ця операція загрожує їх поломкою.

Після розплавлення 90 - 100 % шихти відбирається проба металу на повний хімічний аналіз.

Присадка вапна в завалку і період плавлення забезпечує основність шлаку по розплавленню не менше 2,2 при його масі 6,0 - 8,0 % від маси металеві маси завалки. Після присадки шлакоутворюючих матеріалів піч вмикається на повну потужність, встановлену для цього періоду плавки, з таким розрахунком, щоб забезпечити формування шлаку і нагрів ванни за час визначення хімічного складу проби металу і, тим самим, створюючи необхідні умови для нормального ведення окислювального періоду. При температурі металу 1530°C відбирається друга проба на повний хімічний аналіз.

Періодом плавлення вважається тривалість часу від моменту вмикання печі після завалки шихти до моменту отримання вмісту вуглецю і, при необхідності інших елементів, що задовольняють вимогам проведення наступного періоду плавки і при нормально нагрітому металі [15].

### **2.2.5 Окислювальний період**

Окислювальний період починається після розплавлення шихти і отримання хімічного аналізу на вміст вуглецю, що забезпечує його окислення за час продування не менше 0,20 %. Початком окислювального періоду вважається час початку продування металеві ванни киснем, окислення починається при температурі металу  $(1530 \pm 15)^{\circ}\text{C}$ . Виплавка сталі за даною технологією передбачає поєднання періоду плавлення з окислювальним періодом.

Продувка киснем здійснюється після розплавлення не менше 80 % шихти за допомогою кисневого інжектора для прискорення формування - активного шлаку, з витратою кисню 20-30 м<sup>3</sup>/хв., тиском 8 атм. і - вологістю 0,5 мг/м<sup>3</sup>.

Масова доля вуглецю в кінці періоду окислення повинна забезпечувати отримання його в металі після присадки феросплавів на середньому рівні заданих меж для даної марки сталі.

Витрата кисню 20 - 30 м<sup>3</sup>/хв. на початку періоду окислення і поступово збільшується до максимуму к кінцю періоду окислення. Тиск кисню під час продування металу має бути не менше 80 МПа.

Під час окислювального періоду відбираються проби металу для визначення його хімічного складу. Другу пробу на хімічний аналіз слід відібрати під час продування відразу після появи полум'я в печі.

Відбір проб металу після продувки киснем слід проводити не раніше ніж через 5 хвилин після продувки для визначення масової долі вуглецю, марганцю, фосфору і хрому.

Температура металу по ходу окислювального періоду повинна підвищуватися і до його кінця забезпечувати нормальне проведення відновлювального періоду поза піччю і попадання в заданий хімічний склад. В кінці окислювального періоду температура металу повинна знаходитися в межах (1610 ± 10 ) °С.

Загальна тривалість окислювального періоду 10 - 20 хв. від початку введення окислювачів. Тривалість окислювального періоду визначається з розрахунку, що окислення вуглецю йде із швидкістю 0,04 - 0,05 % вуглецю в хвилину або візуально, по полум'ю з печі.

## **2.2.6 Випуск плавки**

Після окислювального періоду з печі нерозкислений метал випускають в ківш. У печі залишається 10 % металу і 99 % шлаку.

Метал випускається в ошлакований ківш. Ківш під плавку подається очищений від залишків металу і шлаку, з гарним станом зливного носка. Ківш повинен мати температуру внутрішньої поверхні футерування не нижче 900 °С.

Ківш піднімають з установки високотемпературного розігрівання не більше ніж за 10 хвилин до випуску плавки і очищають сталерозливний канал.

Під час випуску плавки, після наповнення ковша на 1/5 об'єму, присаджують в ківш феромарганець, феросиліцій, ферохром.

Дозволяється продувка розплаву аргоном через трубку діаметром 12 мм, розташовану в шиберному затворі, або через пористу пробку в днищі ковша. Після випуску металу відбирається проба на хімічний аналіз і вимірюється температура металу [16].

### **2.2.7 Позапічна обробка стали в агрегаті «під-ківш»**

Для проведення десульфурзації сталі в ковші наводиться рафінувальний шлак з вапна в кількості 8 кг/т і плавикового шпату в кількості 2 кг/т, зберігаючи пропорцію 4:1.

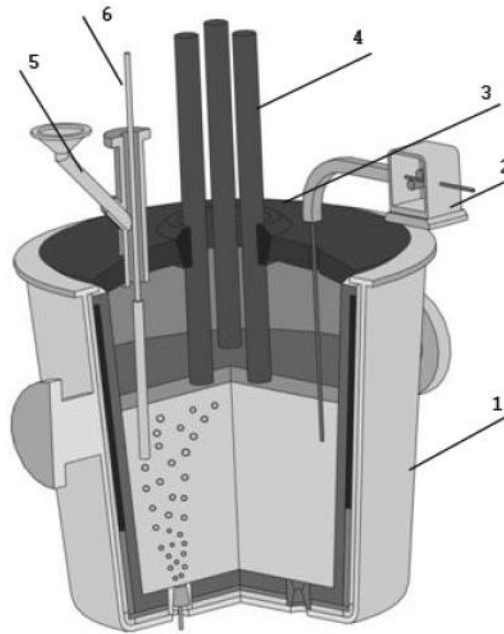
Ківш з металом встановлюють на сталевіз і перевозять під кришку-склепіння (рис. 12). Після установки ковша з металом в робоче положення починають продування металу аргоном з витратою 15 м<sup>3</sup>/т·хв., забезпечуючи перемішування металу, поліпшення умов десульфурзації і дегазації. Електроди при цьому при піднятті.

Потім включаємо дуговий підігрів металу.

Розкислювання шлаку можна проводити порошками коксу з масовою витратою до 0,5 кг/т.

Після отримання рідко рухливого шлаку відбирається проба металу на хімічний аналіз і вимірюється температура металу.

Здійснивши попереднє легування і розкислювання розплаву присадкою феросплавів, нікелю і міді при випуску металу, необхідне доведення сталі до заданого хімічного складу.



1 - сталерозливний ківш, 2 - трайб-апарат, 3 - склепіння агрегату ківш-піч,  
4 - графітовані електроди, 5 - воронка подачі сипучих, 6 - аварійна фурма

Рисунок 12 – Загальна схема установки ківш-піч

Остаточне корегування металу по хімічному складу здійснюється веденням порошкового дроту відповідного складу за допомогою трайб-апарату.

Коректування масової долі вуглецю проводиться вдуванням вуглецевмісних матеріалів під шлак. Допускається коректування по вуглецю присадкою коксового дріб'язку або порошку коксу. Масу розраховують виходячи із співвідношення 15 кг порошку коксу - 0,01 % вуглецю.

Остаточне коректування по масовій долі вуглецю проводиться від 5 до 10 хвилин до закінчення доведення сталі по хімічному складу.

Після введення легуючих і розкислювачів проводиться продувка металу аргоном протягом 5 хвилин, відбирається проба металу і вимірюється

температура. За 5 хвилин до закінчення доведення вмикаємо дугове підігрівання металу до температури 1650 °С.

Потім розливним краном ківш з металом після обробки в агрегаті «під-ківш» встановлюється на сталевоз. Сталевоз за допомогою штовхальника передається у відділення розливки сталі. Рух сталевоза повинен відбуватися плавно, без ривків, з швидкістю не більше 0,4 м/сек. [17].

### **2.2.8 Порядок введення розкислювачів та легуючих матеріалів**

**Вуглець.** Для кращого засвоєння легуючих матеріалів з оксидів і створення відновної атмосфери застосовуємо присадки порошку коксу для розкислення шлаку.

**Кремній.** Легування попередньо розкисленого металу, здійснюємо феросиліцієм марки ФС65, який присаджуємо в кінці відновлювального періоду для повнішого розкислення шлаку і коректування складу металу. Даний феросплав повинен присаджуватися в добре розігрітий метал, за 10 - 20 хвилин до випуску з подальшим ретельним перемішуванням ванни.

**Марганець.** Легування розплаву проводимо феромарганцем ФМн78, додаючи його у відновлювальний період в агрегат LF (під-ківш). Крупність шматків повинна бути не більшою 60 мм.

**Хром.** Для легування застосовуємо кусковий ферохром ФХ005. Ферохром присаджують в ківш з металом одночасно з наведенням відновлювального шлаку в попередньо розкислений метал. Ферохром повинен присаджуватися в прожареному до червоності стані. Можливо також вживання металевого хрому.

**Нікель.** Коректування хімічного складу сталі по нікелю проводимо прожареним електролітичним нікелем Н-1 і Н-0.

**Мідь.** Коректування хімічного складу сталі по міді проводимо металевою міддю М1.

**Алюміній.** Для остаточного розкислення металу вводимо за допомогою

трайб-апарату алюмінієвий дріт з питомою витратою 1 кг/т. При відсутності дроту допускається проводити присадку алюмінію чушками масою до 15 кг [18].



### 3 Спеціальна частина

#### 3.1 Роль перемішування розплаву металу в ванні дугових печей

Перемішування ванни розплаву металу в дугових печах необхідно для нормального протікання технологічного процесу і характеризується двома основними факторами: ефективністю перемішування і витратою енергії.

Однак можливість управління цими процесами в електропечах досліджена мало.

Найчастіше перемішування розплаву металу в ванні дугових печей ведуть у відновлювальний період. Плавка ведеться під відновлювальним білим шлаком, що містить до кінця періоду  $\text{FeO} < 0,5-1,5\%$ . Це дозволяє вирішити ряд завдань, таких як дифузійне розкислення металу (основна відмінна риса цього періоду); регулювання температури металу; закінчення процесу десульфурації металу (досягнення залишкового вмісту сірки відповідно до вимог до хімічного складу сталі); доведення хімічного складу металу до заданого.

При вирішенні металургійних завдань процес перемішування металу і взаємодія його зі шлаком прийнято розглядати як спосіб досягнення певного технологічного результату, спрямованого на підвищення якості металу. Перемішування рідкої ванни впливає на [19]:

- легування;
- процеси десульфурації і дефосфорації;
- видалення неметалевих включень;
- видалення водню і азоту;
- глибоке зневуглецювання металу.

Таким чином, процес перемішування розплаву металу в ванні дугової печі є одним з важливих факторів, що впливають на підвищення продуктивності печі і якість металу. Крім того, без перемішування в

сучасних умовах неможливе проведення процесу автоматизації виплавки металу.

### 3.1.1. Вплив перемішування розплаву металу на технологію виплавки стали в дуговій печі постійного струму

Велике практичне значення в технологічному плані має інтенсифікація перемішування металу в зоні, що безпосередньо прилягає до шлаку. Це, перш за все, відноситься до ефективності десульфурації сталі синтетичним шлаком. Ефективність десульфурації металу шлаком характеризується величинами рівноважного і фактичного коефіцієнта розподілу сірки між шлаком і металом ( $L_S = (S) / [S]$ ). На практиці використовується перемішування за допомогою електромагнітного поля або за допомогою продувки металу аргоном через донний продувочний блок. Облік умов і інтенсивності перемішування металу в печі дозволяє скоригувати відповідним чином процес обробки в цілому.

Перемішування ванни може здійснюватися за рахунок зовнішніх пристроїв. Наприклад, електромагнітний пристрій, який за принципом свого впливу являє собою асинхронний двигун: ротор (рідкий метал) пронизує біжить (в разі статора) або обертовим (в разі електромагніту) магнітним полем і захоплюється в рух у напрямку останнього. Однак поряд з принциповою схожістю переміщуючий пристрій має ряд істотних відмінностей. Відсутній магнітний сердечник в роторі ( $\mu = 1$ ); масивний ротор, за обсягом якого протікають індуковані струми з різко вираженим поверхневим ефектом і ефектом близькості.

Щільність індукованих струмів  $i_h$  знижується зі збільшенням відстані  $x$  до подини ванни і виражається за відомою формулою [20]

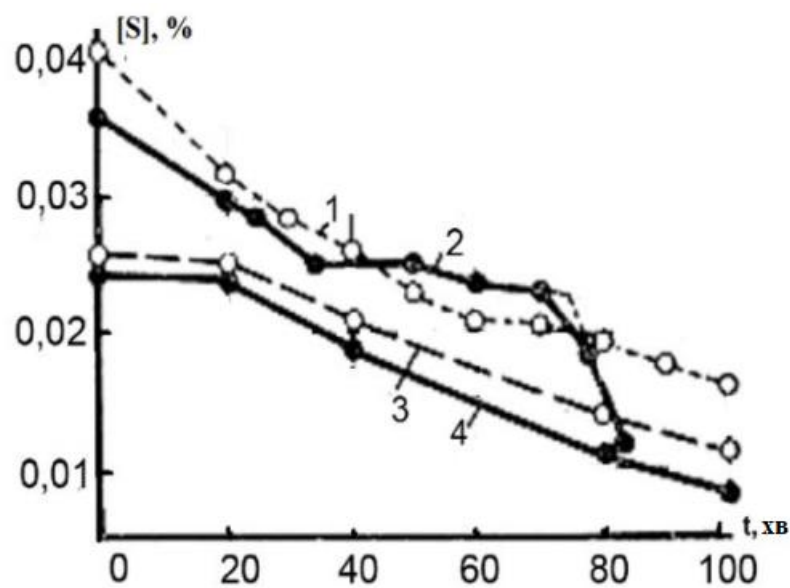
$$i_h = i_0 e^{-2\pi \cdot x \sqrt{\frac{f}{\rho}}},$$

де  $i_0$  - щільність струму на дні ванни, А / см<sup>2</sup>,

$R$  - питомий опір металу, Ом · см,

$f$  - частота струму, Гц.

При використанні електромагнітного перемішування (ЕМП) зростає швидкість десульфурації. Це дозволяє скоротити час тривалості відновного періоду заданого ступеня десульфурації на 0,5- 1,0 год. швидше, ніж при його відсутності або більш низький вміст сірки. Дані зі зміни вмісту сірки в розплаві металу в 10 і 30 т печах під час відновного періоду наведені на рисунку 13 [21].



1, 2 ДСП місткістю 30 т; 3, 4 ДСП місткістю 10 т;

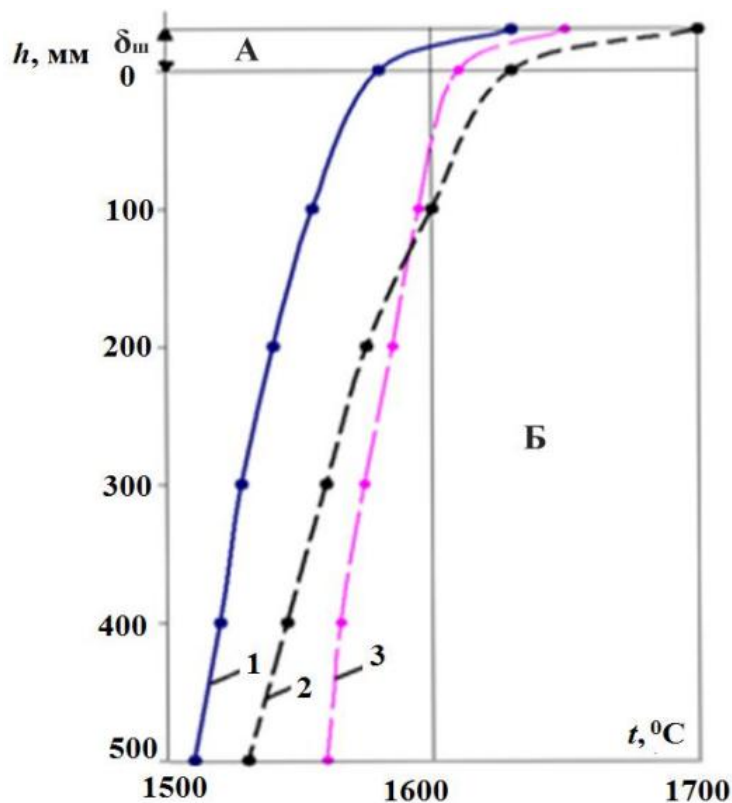
\_\_\_\_\_ - з ЕМП; \_ \_ \_ \_ - без ЕМП

Рисунок 13 – Вміст сірки у розплаві металу від часу (у відновний період)

ЕМП значно впливає на кінетику фізико-хімічних процесів. При використанні ЕМП, за результатами дослідників, зростає швидкість видалення кисню і сірки (на 70 - 100%), а також розчинення легуючих добавок. Це сприяє гомогенізації розплаву металу по температурі і хімічному складу [24]. При застосуванні ЕМП [20] перепад температури по глибині ванни ДСП-25 в відновлювальний період знижується від 100 до 5-20 °С, гідродинамічний рух рідкометалевої ванни підсилює дифузійне видалення

домішок, в результаті вміст неметалевих включень зменшується, а «ефективна» поверхня розділу метал – шлак росте. Отже, скорочення відновного періоду можливо без погіршення якості металу на 20-30%.

На рисунку 14 наведені графіки розподілу температури металу і шлаку по глибині ванни в 20-тонних дугових печах в кінці періоду розплавлення. Заміри температури здійснювали в зоні між електродами другої і третьої фаз на відстані половини радіуса між стінкою печі і віссю ванни [21]. Аналіз результатів показав, що при ЕМП процеси усереднення по температурі і хімічному складу здійснюються швидше, ніж при перемішуванні вручну, яке проводили в 50-60-ті роки минулого століття.

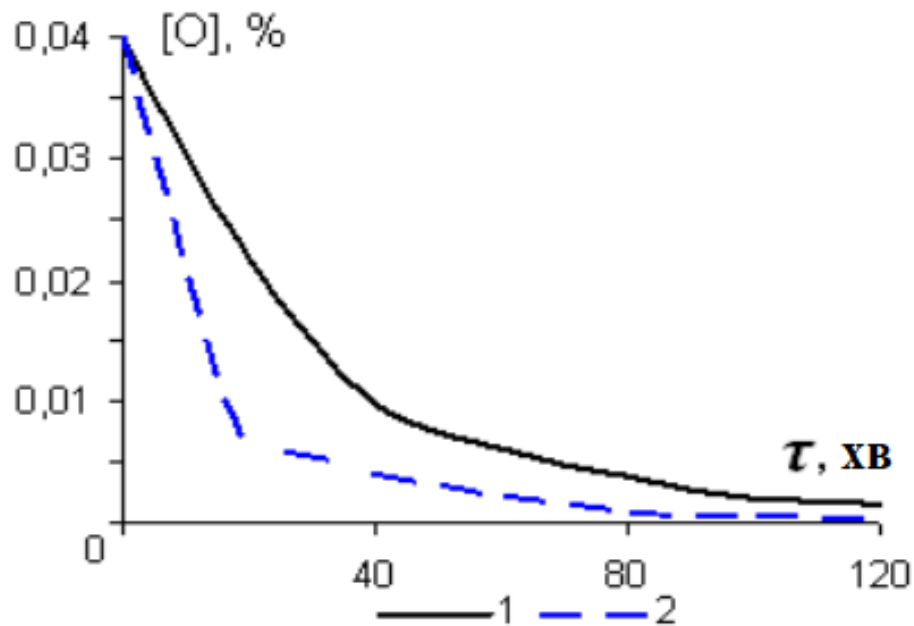


А – шлак, Б – рідкий метал, 1 – без ЕМП, 2 – з ЕМП,  
3 – ручне перемішування

Рисунок 14 – Розподіл температури шлаку та металу по глибині ванни

У відновний період плавки електромагнітне перемішування істотно прискорює процес розкислення (рис. 15). В результаті кінцевий вміст кисню

виявився в три рази менше, ніж без ЕМП, час для досягнення однакового кінцевого вмісту ( $\sim 0,0015\%$  [O]) скорочується в 1,7 рази [23].



1 – без перемішування, 2 – з електромагнітним перемішуванням

Рисунок 15 – Вплив електромагнітного перемішування на швидкість розкислення в 15-т печі

Таким чином, аналіз розглянутих даних показує, що для поліпшення процесів розкислення, гомогенізації розплаву металу при введенні легуючих присадок, усереднення по температурі і хімічним складом доцільно проводити електромагнітне перемішування.

### 3.2 Огляд існуючих способів перемішування металу в ванні дугової печі постійного струму

В даний час в металургійних агрегатах застосовують численні способи перемішування металу, які можна умовно розділити на наступні групи (рис. 16): хіміко-технологічні, механічні, газодинамічні і електромагнітні.

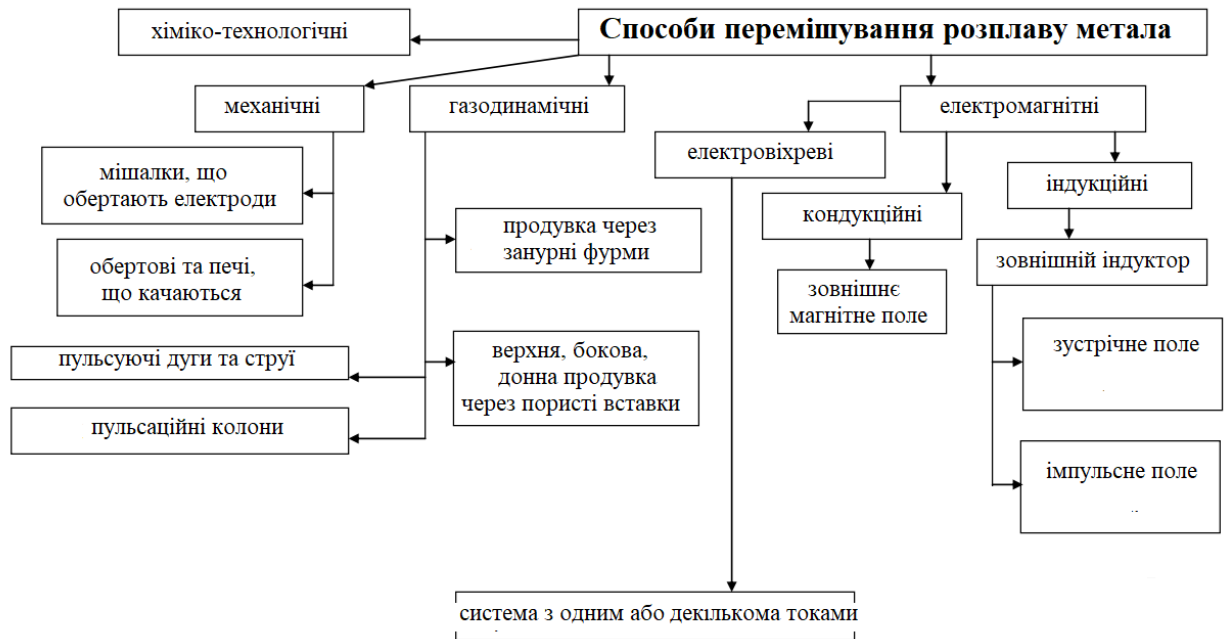


Рисунок 16 – Класифікація способів перемішування металу

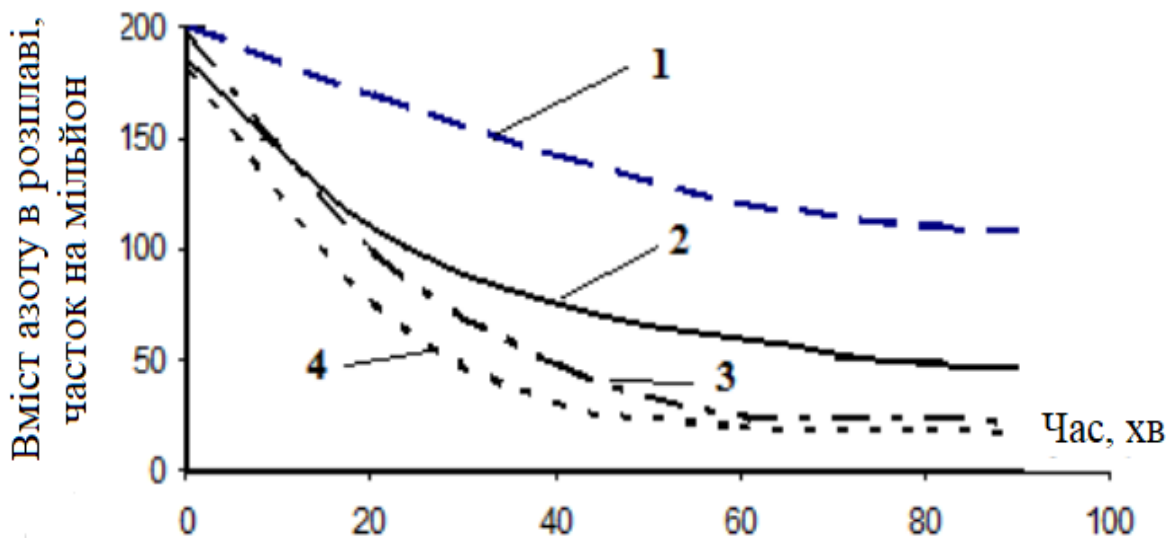
Хіміко-технологічні способи використовують особливості протікання хімічних реакцій. Механічне перемішування засноване на використанні падаючого струменя або струменів інертних газів, спеціальних конструктивних елементів (мішалки, качалки, гребки і т. п. пристрою), занурених у розплав металу, або шляхом вібраційного впливу [18]. Однак механічні способи перемішування мають ряд недоліків:

- швидкий знос робочих частин перемішують при підвищених температурах і агресивному шлаку;
- можливість забруднення металу включеннями, що утворилися при руйнуванні футерування і мішалок;
- необхідність ручного перемішування рідкого металу металевими гребками для прискорення розчинення легуючих. Ця застаріла важка операція вимагає додаткового витрачання електроенергії на перегрів ванни і подовження процесу плавки і пов'язана з ризиком травмування персоналу.

Газодинамічні способи найчастіше пов'язані з використанням для перемішування газових потоків і плазмових струменів шляхом верхньої, бокової або донної продувки через фурми і пористі вставки [24].

У металургії введена технологія Danarc, що передбачає донне перемішування металевого розплаву газом, безпосередньо вводиться в рідку ванну ДСП, установку кисневих фурм для подачі в ванну суміші азоту, природного газу і кисню. Такі системи працюють на печах ВАТ «Молдавський металургійний завод» (м. Рибниця), ВАТ «ММК» (м. Магнітогорськ) і ін.

Перемішування металу може здійснюватися шляхом вдування метану в дугу, що прискорює перенесення тепла від дуг до розплаву металу, призводить до прискорення процесу видалення азоту з розплаву. Підвищення температури поверхні металу викликає більш високі швидкості металургійних реакцій на поверхні розділу газ-метал (рис. 17) [25].



1 – чистий аргон; 2 – 90% Ar+10% H<sub>2</sub>; 3, 4 – 95 % Ar+5% CH<sub>4</sub>

Рисунок 17 – Зміна вмісту азоту в розплаві від часу продувки при вдуванні водню та металу з перемішуванням розплаву (40 та без перемішування розплаву (1,2,3))

Однак серед існуючих методів впливу на перемішування розплаву особливе місце займає електромагнітний спосіб, якому властиво безконтактний вплив на рідкий метал.

### **3.3 Аналіз електромагнітних способів перемішування металу в ванні дугової печі**

Електромагнітне перемішування металу дозволяє отримувати високоякісний метал і застосовується для підвищення структурної та хімічної однорідності металу. ЕМП розплаву можливо за рахунок наступних способів силових впливів [26]:

- між зовнішнім магнітним полем і індукованими струмами (індукційний спосіб перемішування);
- між струмами, що протікають між електродами через розплав із зовнішнім магнітним полем (кондукційний спосіб перемішування);
- між одним або декількома струмами, що протікають у ванні, з власними магнітними полями (електровіхревий спосіб перемішування).

#### **3.3.1 Індукційний спосіб перемішування розплаву металу**

Перша конструкція пристрою, що перемішує, Л.І. Морозенського, запропонована в 1928 р, не отримала застосування в практиці металургійного виробництва, тому що застосовувався струм промислової частоти ( $f = 50$  Гц), але його принцип був використаний для створення більш досконалих пристроях. Найбільш поширеним способом індукційного перемішування металу в кінці ХХ століття в дугових печах стало застосування двофазного статора. Вперше система електромагнітного перемішування була встановлена на однокамерні піч для плавки алюмінію компанією АВВ в 1969 р. Технологія ЕМП безперервно удосконалюється і становить серйозну



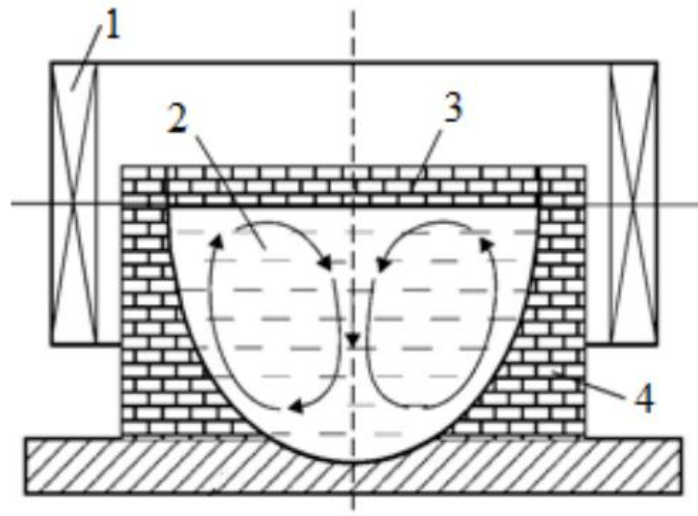
конкуренцію іншим методам перемішування. В даний час в світі функціонує не менше 500 систем ЕМП, які в основному зосереджені в Японії [27].

Основним компонентом системи ЕМП є індуктор з водяним охолодженням, який встановлюється зовні на бічній стінці або під днищем печі. Інтенсивність електромагнітного поля, що біжить убуває в експоненційній залежності в міру віддалення від магнітного сердечника обмоток індуктора, тому одним з важливих критеріїв для підбору потужності перемішувача є відстань між індуктором і ванною металу. Щоб магнітні силові лінії не розсіювалися, а проникали всередину розплаву, необхідна установка «вікна» з листа немагнітної аустенітної сталі, який приварюють до корпусу печі відповідно до розміру індуктора.

За даними Л.Л. Тіра, М.Я. Столова, в період легування та рафінування металу на індуктор подається приблизно лише половина повної потужності. Внаслідок цього швидкість природної циркуляції розплаву у ванні зменшується в 1,4 рази в порівнянні з її значенням в період розплавлення. Така ослаблена циркуляція недостатня в період легування, коли особливо важливо ефективно перемішування металу для прискорення засвоєння легуючих добавок і вирівнювання хімічного складу ванни [21].

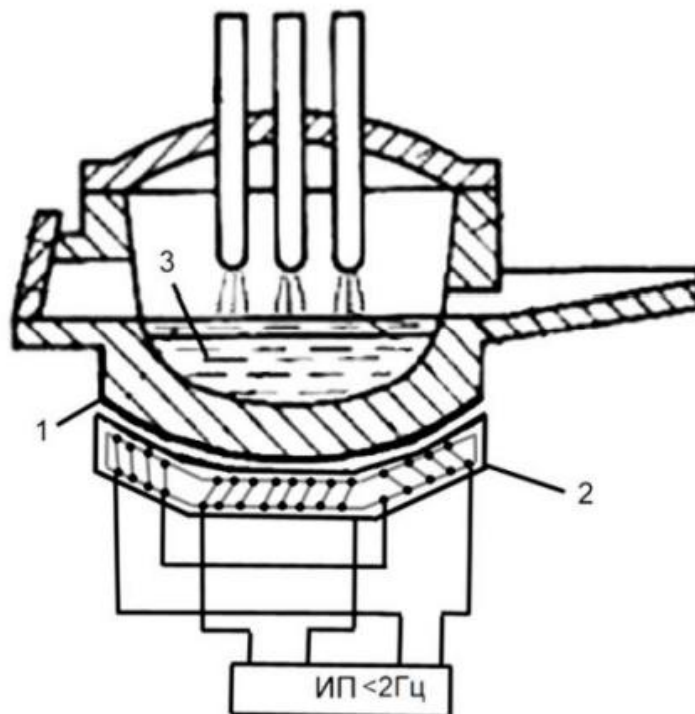
В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розробили спосіб, який дозволяє створити умови для посилення перемішування потоків металу в рідкій ванні. Найефективнішим і технологічним є таке розташування індуктора, щоб асиметрія електромагнітної системи тигель-індуктор і гідродинамічних граничних умов забезпечувала придушення вихрових контурів один одного. Для придушення верхнього контуру макропотоків розплаву слід змістити індуктор таким чином, щоб горизонтальна вісь симетрії збігалася з верхньою кромкою розплавленого металу (рис. 18). При цьому потоки розплаву в центральній частині ванни направляються вниз, на дно тигля. На поверхні розплаву утворюється увігнутість, а опуклості розташовуються поблизу стінок тигля.

Найбільш широке промислове застосування в кінці минулого століття отримали індуктори двохфазного струму низької частоти (0,3-2 Гц), встановлені під піччю (рис. 19).



1 – індуктор, 2 – розплав, 3 – кришка, 4 – тигель

Рисунок 18 – Схема руху макропотоків рідкого металу



1 – днище печі, 2 – індуктор, 3 – розплав

Рисунок 19 – Схема дугової печі з зовнішнім індуктором

Під днищем печі, виконаної з немагнітного матеріалу, розміщується статор з двома обмотками, струми яких зсунуті по фазі на  $90^\circ$ . Створюване статорними обмотками поле, що біжить приводить в рух шари металу.

При перемиканні обмоток можлива зміна напрямку руху металу. Пристрій працює від електромашинного перетворювача частоти або тиристорного перетворювача [27].

Індуктор генерує низькочастотне магнітне поле, що біжить, яке проникає через немагнітне «вікно» корпусу печі і вогнетривку футеровку і призводить розплавлений метал в рух за принципом, подібного роботі лінійного електродвигуна, але з особливостями, характерними для електропровідних рідин, знаходяться в рухомому магнітному полі.

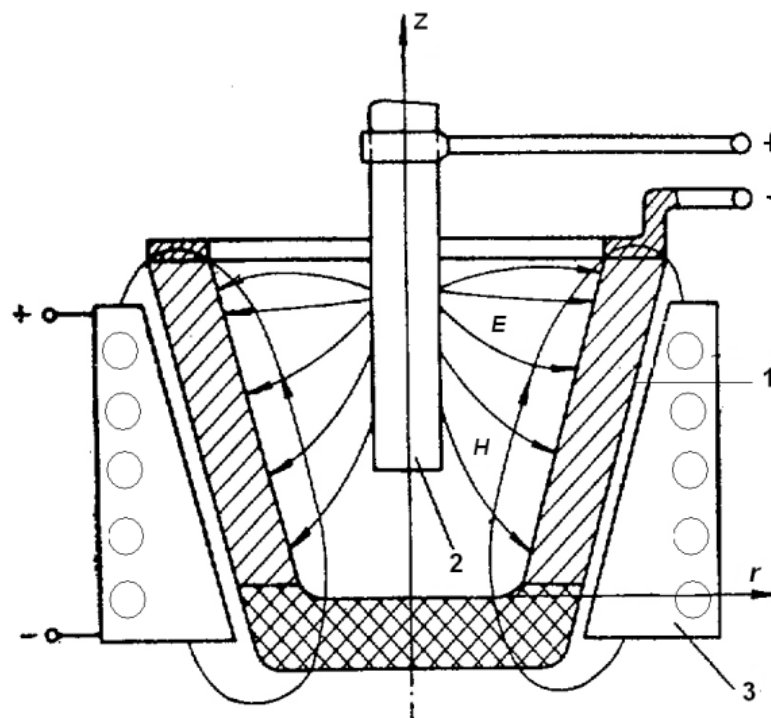
Індукційний спосіб перемішування характеризується інтенсивним рухом поблизу джерела електромагнітного поля, що біжить. Зменшення інтенсивності магнітного потоку в зазорі між індуктором і металом змушує знижувати товщину футерування стінок, а це спричиняє її низьку стійкість, крім цього, вартість установки індуктора часто порівнянна з вартістю плавильного агрегату.

Спосіб дуже добре вивчений і широко застосовувався в трифазних дугових печах в другій половині ХХ ст., в даний час використовується обмежено. Наприклад, в цехах ливарного виробництва, обладнаних печами малої і середньої місткості без донної продувки, які працюють по двохшлаковій технології. У них відновлювальний період і доведення металу по хімічному складу проводиться безпосередньо в печах, в яких (якщо не використовується статор) відсутні будь-які засоби для перемішування ванни, крім механічного перемішування ручним інструментом. Тому проблема організації перемішування рідкого металу зберігає свою актуальність.

### 3.3.2 Кондукційний спосіб перемішування розплаву металу

Одним з перших пристроїв для ЕМП розплаву кондукційним способом була дугова піч з обертової дугою, запропонована Тельним С.І. в 1916 р [28]. У футеровці днища однофазної печі з провідної подини розміщувався конічний соленоїд змінного або постійного струму. При взаємодії осьової складової магнітного поля з радіальною складовою електричного поля дуга і розплав оберталися з деякою кутовою швидкістю. Застосування змінного струму для живлення соленоїда призводило до появи вторинних течій в меридіональних площинах за рахунок взаємодії магнітного поля з індукованим ним азимутним струмом [29].

Відомий спосіб ЕМП струмопровідних розплавів, при якому для перемішування використовують взаємодію однорідного аксіального магнітного поля і неоднорідного радіального поля (рис. 20).



1 – корпус, 2 – електрод, 3 – соленоїд

Рисунок 20 – Пристрій для електромагнітного перемішування

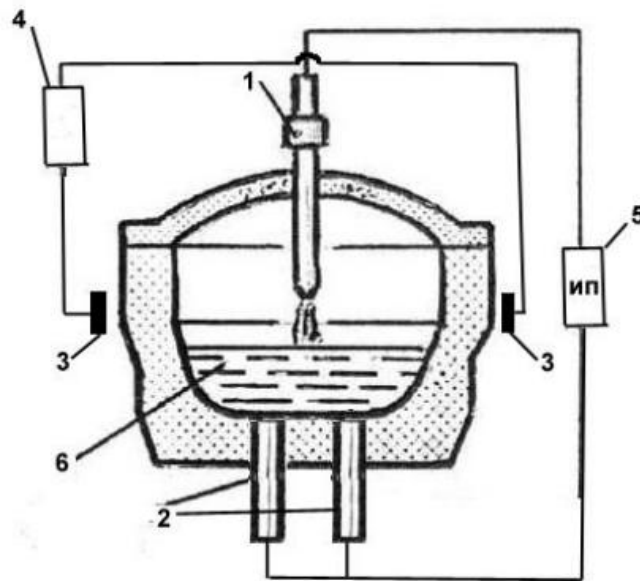
Корпус пристрою для ЕМП має електропровідні стінки і непровідяще днище. Навколо корпусу розміщений соленоїд, який створює однорідне аксіальне магнітне поле напруженістю  $H$ . При пропущенні електричного струму через розплав в ньому виникає неоднорідне радіальне електричне поле напруженістю  $E$ . При впливі сил, що виникають при взаємодії магнітного і електричного полів, розплав в ванні приходить в обертання. Внаслідок неоднорідності електричного поля в ванні з'являються різноорієнтовані вихори, які перемішують розплав.

Таким чином, при кондукційному способі перемішування для одержання зовнішнього магнітного поля потребує додаткового обладнання, яке необхідно захищати від перегріву, що в підсумку позначається на якості металу і витратах на установку печі.

Оскільки потужність електромагнітного перемішувача зростає пропорційно квадрату немагнітного зазору встановлювати статор під подини необхідно з мінімальним зазором, при цьому зростає вплив магнітного потоку, а це, в свою чергу, призводить до зниження стійкості футеровки.

Розроблено конструкцію ДППТ, де по зовнішньому діаметру корпусу встановлені електромагніти постійного струму. Електромагніти розміщені вище максимального рівня металу, а їх осі розташовані під кутом  $120^{\circ}$  відносно один одного. Електромагніти включаються в разі відхилення дуги від центру плавильної камери (рис. 21). Однак таке розташування електромагнітів не дозволяє ефективно впливати на процеси перемішування об'єму рідкої ванни, що призводить до виникнення великих застійних зон в рідкій ванні і зносу футеровки в області подового електрода.

В роботі [30] запропонована дугова електропіч, яка містить ванну, трифазний силовий трансформатор, три електрода для плавлення металу. Робочі частини електродів розташовані в просторі печі і пофазно підключаються до вторинних обмоток силового трансформатора. Піч забезпечена джерелом постійного струму і трифазною групою індуктивного опору, а ванна виконується з подовим провідником.



1 –електрод, 2 – подові електроди, 3 – електромагніти,  
 4 – блок керування електромагнітами, 5 – джерело живлення  
 Рисунок 21 – Дугова піч з двома подовими електродами

При цьому один полюс додаткового джерела постійного струму підключається до подового провідника для з'єднання з струмопровідною частиною шихти в ванні. Інший полюс - до нульової точки силового трансформатора та / або до нульових точок трифазної групи індуктивного опору для забезпечення одночасного з'єднання крізь електричні дуги подового провідника, силового трансформатора та ванни печі.

Таким чином, показано, що технологія кондукційного перемішування розплаву металу є досить перспективною. Але в даний час практично не використовується через недостатнє дослідження впливу зовнішніх магнітних полів на токонесячий розплав і відсутність простих, надійних конструкцій зі створення зовнішніх магнітних полів із заданою або керованою конфігурацією.

### 3.3.3 Електровіхревий спосіб перемішування розплаву металу

У металургії існують технологічні процеси і агрегати, де визначальну роль відіграє електричний струм великої сили, що протікає через обсяг рідкого металу. Об'ємні електромагнітні сили, обумовлені взаємодією електричного струму з власним магнітним полем і полем струмоведучих елементів, генерують в розплаві електровіхреві течії, які суттєво впливають на роботу таких пристроїв. Грамотне використання електровіхревих течій підвищує техніко-економічні характеристики металургійного процесу і якість одержуваного металу.

Для інтенсифікації масопереносу в дугових печах, крім традиційних способів, з'являються технології, засновані на особливостях руху токонесущого розплаву під дією власних електромагнітних полів, а також конструктивних характеристик печі і особливостей електричних регуляторів джерел струму. Змінюючи кількість і стан склепінених або подових електродів, можна регулювати інтенсивність руху металу, отже, і його перемішування.

У Росії, Україні, Казахстані, Естонії успішно працюють ДППТ з перемішуванням розплаву за допомогою ЕВТ. Головною відмінністю цих печей від існуючих є установка двох і більше ПЕ і періодична зміна струму, що проходить через них (рис. 22). Для реалізації процесу перемішування ЕВТ в подині печі встановлюють не менше двох ПЕ, зміщених щодо осі ванни. Під плямою дуги розвивається інтенсивний рух металу.

Частка енергії з дуги, що вводиться безпосередньо в розплав, досягає 80-90%, холодний метал набігає під дугу і йде всередину розплаву, що запобігає локальному перегріву розплаву. Взаємодія горизонтальних і вертикальних складових струму з електромагнітним полем викликає перемішування металу у вертикальному перерізі і обертальний рух в горизонтальному (рис. 23).

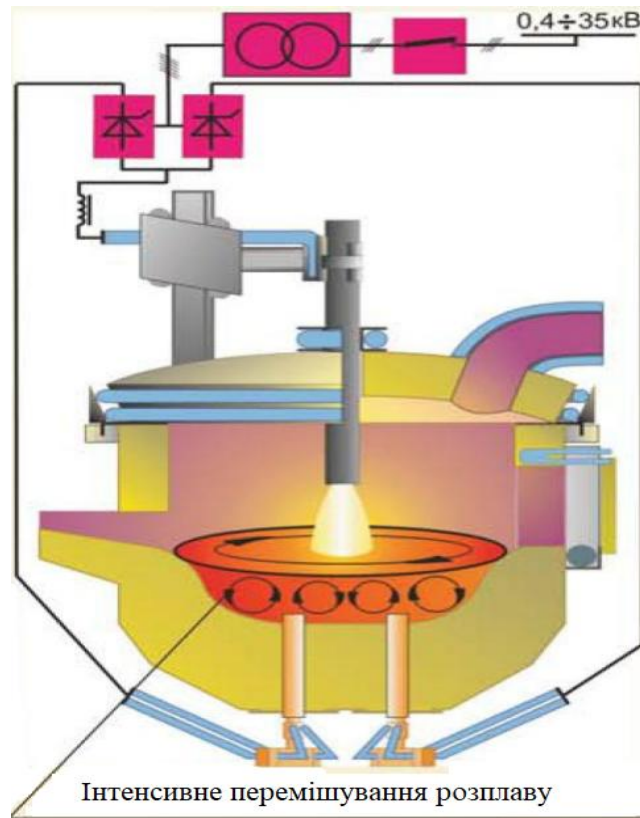
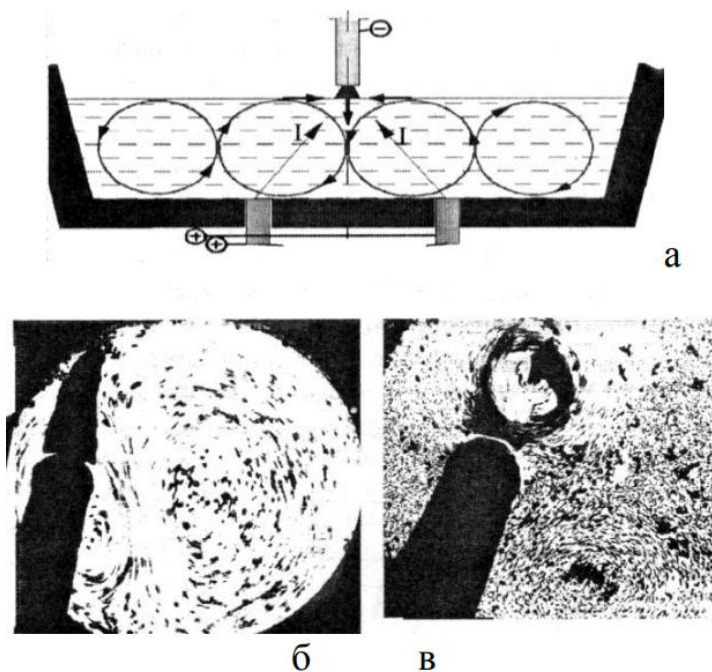


Рисунок 22 – Загальний вид ДППТ з двома подовими електродами



а – перемішування в поперечному перерізі розплаву,  
 б – система перемішування ввімкнена, в – система перемішування вимкнена

Рисунок 23 – Схема ЕМП перемішування в ДППТ



В Японії в 2010 р. на заводі Тахара компанії Tokyo Steel успішно введена в експлуатацію найбільша в світі двохелектродна ДППТ, обладнана системою Consteel®. ДППТ має одну ванну (маса продукції, що випускається плавки 300 т, загальною місткістю 420 т) і відповідає сучасним тенденціям розвитку сталеплавильного виробництва. Піч характеризується високою ефективністю завдяки низьким експлуатаційним витратам, обумовленим малим енергоспоживанням і невеликим штатом працівників [31].

У ДППТ здійснюється безперервна завалка скрапу при наявності рідкого залишку, що забезпечує швидке розплавлення скрапу в ході всього процесу. Для суміщення процесів плавлення шихти з обробкою металу шлаком, а також для захисту металу від пічної атмосфери основну частину шлакоутворюючих матеріалів подають в піч разом з шихтою. Після розплавлення металу шлак можна видалити, наприклад з метою дефосфорації сталі, при цьому новий шлак утворюється за 2-3 хв. після подачі шлакоутворюючих матеріалів. ЕОТ дозволяють підтримувати велику ефективну поверхню «шлак-метал», забезпечувати транспортування розплаву в зону взаємодії зі шлаком, гомогенність температури і хімічного складу металу.

За даними [29], в печах місткістю від 0,5 до 25 т швидкість руху рідкого металу в центральній частині ванни складає 0,12-0,35 м / с, тобто реалізуються режими розвинених турбулентних течій, при яких у ванні забезпечується ефективне вирівнювання полів температури і концентрації присадок, що додаються в метал.

Таким чином, електровіхреве перемішування розплаву металу в ванні ДППТ є перспективним напрямком, хоча і має менше наукове опрацювання і досвід практичного використання.

### 3.4 Вплив положення електродів, що підводять струм на течії розплаву в ванні ДППТ

Визначимо, як OEMС (об'ємні електромагнітні сили) впливають на характер течії розплаву в залежності від їх розташування на подині [32].

За визначенням OEMС проаналізовано кілька варіантів взаємного розташування катода і подового електрода (електродів). Розглянуто наступні варіанти:

- вісь катода збігається з віссю ванни ( $r = 0$  мм):

1) один ПЕ, вісь якого збігається з віссю ванни (рис. 24);

2) два ПЕ, осі яких знаходяться в одній площині з віссю ванни (рис. 25);

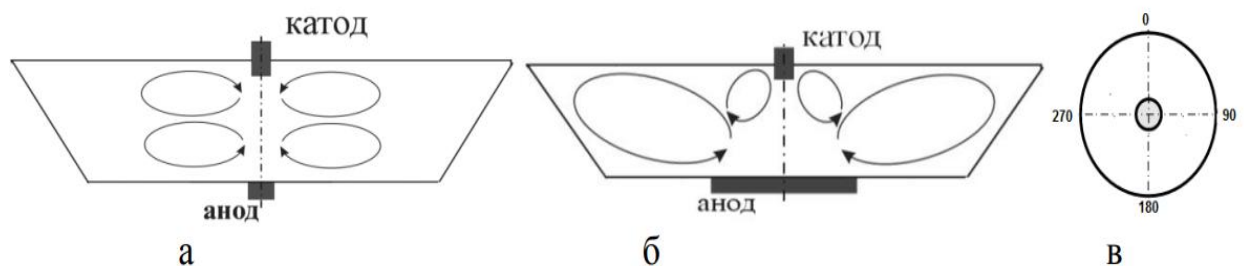
3) два асиметрично розташованих ПЕ, ( $\Delta\varphi = 90^\circ$ ), (рис. 26);

4) два асиметрично розташованих ПЕ ( $\Delta\varphi = 120^\circ$ ), (рис. 27);

- вісь катода не збігається з віссю ванни ( $r \neq 0$  мм):

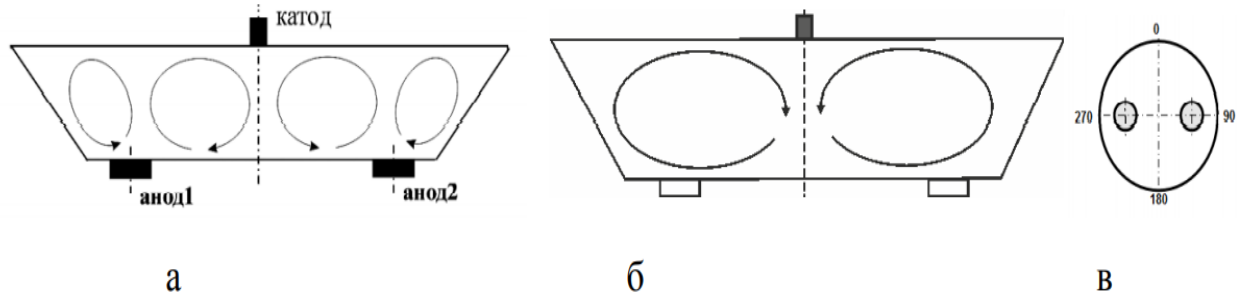
5) вісь катода зміщена від осі ванни ( $\Delta\varphi = 225^\circ$ ), два ПЕ ( $\Delta\varphi = 90^\circ$ ) (рис. 28).

Аналіз малюнків показав, що величина OEMС, що виникають в розплаві, залежить від кількості ПЕ, місця їх розміщення на подині, а також від місця установки склепінного електрода.



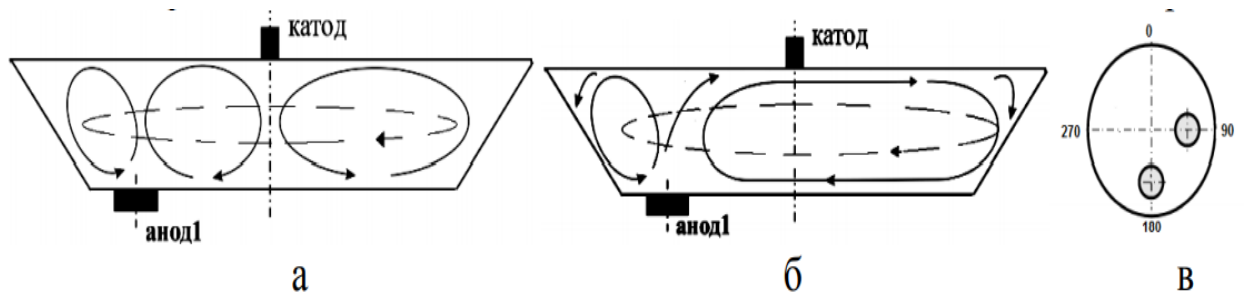
а –  $d_a = d_k$ , б –  $d_a < d_k$ , в – розташування подового електрода

Рисунок 24 – Схема руху розплаву для ванни з одним ПЕ, розташованим по осі ванни



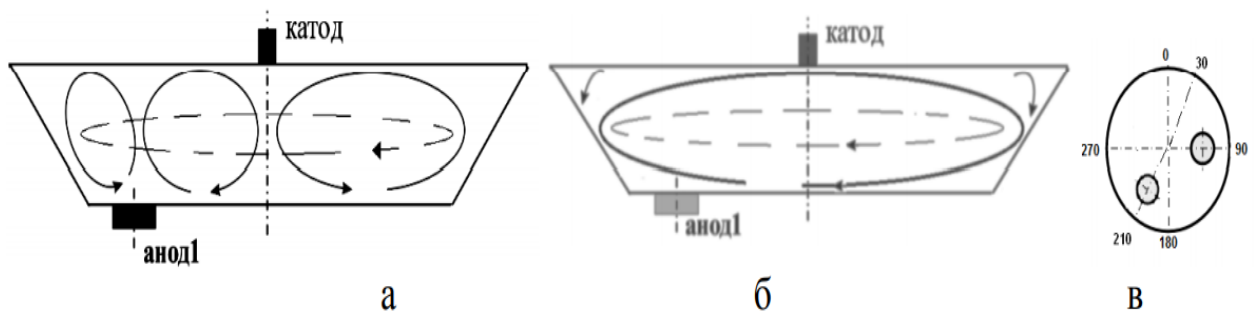
а – в площині  $0-180^{\circ}$ , що проходить через вісь подових електродів,  
 б – в площині  $90-270^{\circ}$ , в – розташування подового електроду

Рисунок 25 – Схема руху розплаву для ванни  
 з двома подовими електродами



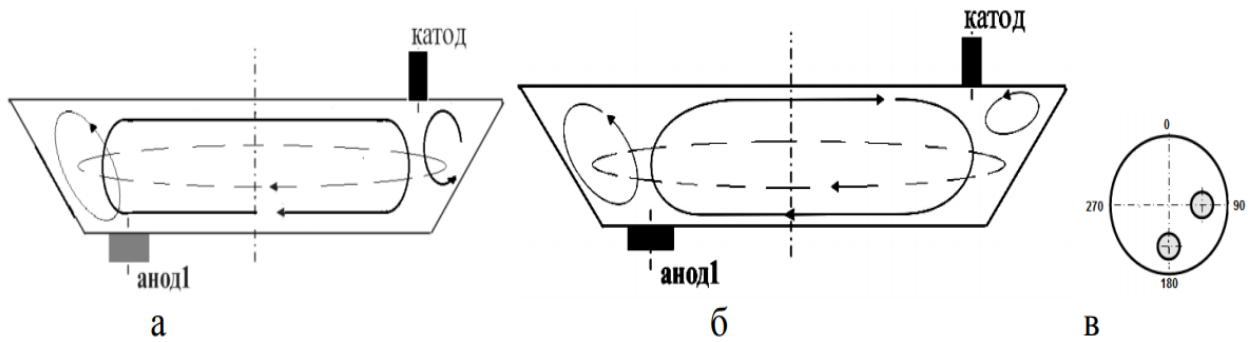
а – в площині  $90-270^{\circ}$ , б – в площині  $45-225^{\circ}$ ,  
 в – розташування подового електроду

Рисунок 26 – Схема руху розплаву з двома ПЕ



а – в площині  $90-270^{\circ}$ , що проходить через вісь одного з подових  
 електродів, б – в площині  $45-135^{\circ}$ , в – розташування подового електроду

Рисунок 27 – Схема руху розплаву для ванни з двома ПЕ



а - в площині  $90-270^{\circ}$ , б - в площині  $45-225^{\circ}$ ,

в - розташування подового електрода

Рисунок 28 - Схема руху розплаву для ванни з двома ПЕ

Для всіх випадків спостерігається стягування розплаву металу до катода і зонам розміщення подових електродів (анодів), його підйом уздовж стінок ванни і в областях, розташованих над подовими електродами. Встановлено, що найкращими є підключення анодів і катода за схемами № 4 і 5, тому що в цих випадках спостерігається більш повне залучення розплаву в рух в об'ємі ванни, а виникнення застійних зон мінімально.

З точки зору електровіхревого перемішування найменш вигідне підключення електродів по схемі № 1, так як в даному випадку відсутній азимутальний рух розплаву.

Таким чином, зміщення одного або двох ПЕ і катода від осі ванни викликає виникнення істотних радіальних і азимутальних складових ОЕМС, які сприяють осьовому обертанню розплаву, що практично відсутнє у ванні ДППТ з одним центральним подовим електродом [33].

## ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі магістра була проведена наступна робота:

1. В загальній частині роботи досліджено вплив легуючих елементів на властивості сталі марки 10ХСНД. Проведено аналіз існуючих технологій виплавки конструкційних марок сталі, виходячи з якого для виробництва сталі 10ХСНД була обрана сучасна технологія виплавки за схемою «ДСП - «піч-ківш»-МБЛЗ».

2. Аналіз розглянутих даних показав, що для поліпшення процесів розкислення, гомогенізації розплаву металу при введенні легуючих присадок, усереднення по температурі і хімічним складом доцільно проводити електромагнітне перемішування.

3. Визначено, що електровіхреве перемішування розплаву металу в ванні ДППТ є перспективним напрямком, хоча і має менше наукове опрацювання і досвід практичного використання. Процес характеризується високою ефективністю завдяки низьким експлуатаційним витратам, обумовленим малим енергоспоживанням і невеликим штатом працівників, реалізуються режими розвинених турбулентних течій, при яких у ванні забезпечується ефективне вирівнювання полів температури і концентрації присадок, що додаються в метал.

4. Аналіз способів перемішування металу і їх порівняння показали, що для ДППТ технологія перемішування з використанням двох і більше подових електродів досить перспективна. Вона отримала реальне втілення завдяки появі потужних керованих джерел живлення, використання надійних подових електродів і вдосконалення конструкції печі.

5. Встановлено, що найкращими є підключення анодів і катода за схемами № 4 і 5, тому що в цих випадках спостерігається більш повне залучення розплаву в рух в об'ємі ванни, а виникнення застійних зон мінімально.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. БІЗНЕСІНФОРМ № 5, 2012, с-116-120.
2. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2225>.
3. Виробництво промислової продукції за видами в Україні за січень – грудень 2011 року. Статистичний бюлетень / Державна служба статистики [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [www.ukrstat.gov.ua](http://www.ukrstat.gov.ua).
4. Україна в цифрах у 2010 році. Державний комітет статистики України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ukrstat.gov.ua/>.
5. [http://pro-consulting.com.ua/news\\_company/2012/02/01/\\_sol\\_ekonomiki\\_metal\\_39980.htm](http://pro-consulting.com.ua/news_company/2012/02/01/_sol_ekonomiki_metal_39980.htm).
6. Гольдштейн, М. И. Специальные стали [Текст]: учебник для вузов / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. Москва: Металлургия, 1985. 408с.
7. Матросов, Ю. И. Сталь для магистральных газопроводов [Текст] / Ю. И. Матросов, Д. А. Литвиненко, С. А. Голованенко. Москва : Металлургия, 1989. 288 с.
8. Марочник сталей и сплавов [Текст] : справочник / ред. В. Г. Сорокин. Москва : Машиностроение, 1989. 639 с.
9. ГОСТ 19281-89. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия.
10. Гольдштейн, Я. Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали [Текст] / Я. Е. Гольдштейн, В. Г. Мизин. Москва : Металлургия, 1986. 272 с.
11. <http://www.stroitelstvo-new.ru/sudostroenie/svoystva-stali.shtml>.
12. Кудрин, В. А. Технология получения качественной стали [Текст] / В. А. Кудрин, В. М. Парма. - Москва : Металлургия, 1984. 320 с.
13. Воскобойников, В. Г. Общая металлургия [Текст] : учебник для вузов / В. Г. Воскобойников, В. А. Кудрин, А. М. Якушев ; ред. В. Г. Воскобойников. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва : Металлургия, 1985. 480 с.
14. Кудрин, В. А. Теория и технология производства стали [Текст] : учебник для вузов / В. А. Кудрин. Москва : Мир ; АСТ, 2003. 527 с.

15. Выплавка стали и сплавов в электродуговых печах с основной футеровкой. Технологические инструкции ЗМЗ. 2005.
16. Явойский, В. И. Научные основы современных процессов производства стали [Текст] / В. И. Явойский, А. В. Явойский. Москва : Metallurgy, 1987. 183 с.
17. Смирнов, Н. А. Рафинирование стали продувкой порошками в печи и ковше [Текст] / Н. А. Смирнов, В. А. Кудрин. Москва : Metallurgy, 1986. 168 с.
18. Еднерал, Ф. П. Электрoметаллургия стали и ферросплавов [Текст] : учеб. пособие / Ф. П. Еднерал. - 4-е изд., испр. и доп. Москва : Metallurgy, 1977. 484 с.
19. Плавка чугуна в дуговых печах постоянного тока нового поколения ОАО «Курганмашзавод» / И.Д. Андреев, А.В. Афонаскин, В.С. Евсеев // Литейное производство. 2005. № 1. С. 27–28.
20. Окорoков Н.В. Электрoмагнитное перемешивание металла в дуговых сталеплавильных печах. М.: Metallurgizdat, 1961. 176 с.
21. Тир Л.Л., Столов М.Я. Электрoмагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электрoпечах. М.: Metallurgy, 1975. 224 с.
22. Зубарев А.Г. Интенсификация электрoплавки. М.: Metallurgy, 1972. 208 с.
23. Об эффективности работы дуговых печей постоянного тока нового поколения при выплавке чугуна и стали / А.В. Афонаскин, И.Д. Андреев, Д.В. Князев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова № 1. 2005. С. 26–31.
24. Повышение напряжения дуги и удаление азота путем вдувания метана при электрoплавке (реф.) // Новости черной металлургии за рубежом. 2004. № 4. С. 44–45.
25. Повышение напряжения дуги и удаление азота путем вдувания метана при электрoплавке (реф.) // Новости черной металлургии за рубежом. 2004. № 4. С. 44–45.

26. Ячиков И. М. Интенсификация массопереноса в электропечах постоянного тока: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 132 с.
27. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Мальков Н.В. ЭлектрOMETаллургия стали и ферросплавов. М.: Metallургия, 1995. 592 с.
28. Повх И.Л., Капуста А.Б., Чекин Б.В. Магнитная гидродинамика в металлургии. М.: Metallургия, 1974. 240 с.
29. Чернышов И.А. Электромагнитное воздействие на металлические расплавы. М.: Metallургиздат, 1963. 86 с.
30. Пат. 2191335 РФ, МПК7 F27B3/08 Плавильная дуговая печь / С.П. Бакуменко. Оpubл. 20.12.2001.
31. Адати Т., Селлан Р. Сверхмощная 420-тонная электродуговая печь компании Токуо 138 8 13 Steel, Япония // Metallургическое производство и технология. 2012. № 2. С. 8–17.
32. Ячиков И.М., Колокольцев В.М., Портнова И.В. Электромагнитные силы в ванне дуговой печи постоянного тока // Черные металлургия: бюллетень НТиЭИ. 2007. № 8. С. 25-28.
33. Портнова И.В. Повышение эффективности перемешивания металла в ванне путем совершенствования конструкции дуговой печи постоянного тока малой вместимости: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск. 2018.