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

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

Кваліфікаційна робота / проєкт

перший (бакалаврський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему *Огляд технологічних особливостей електрошлакового переплаву зливків листової сталі*

Виконав: студент *4* курсу, групи 6.1362-м-с
спеціальності *136* «*Металургія*»
(код і назва спеціальності)
освітньої програми
Металургія
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації
(код і назва спеціалізації)
К. А. Піщенко
(ініціали та прізвище)

Керівник *доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенноїбезпеки, к. т. н., доц. Воденнікова О.С.*
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент *доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, к.т.н., доцент Нестеренко Т.М.*
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

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

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

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

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Піщенко Кіріллу Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи (проєкту) *Огляд технологічних особливостей електрошлакового переплаву зливків листової сталі*
керівник роботи *канд.техн.наук, доцент Воденнікова Оксана Сергіївна*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "*27*" *грудня 2024 року № 2031-с*
2. Строк подання студентом роботи *11.06.2025 р.*
3. Вихідні дані до роботи *Науково-технічна література, статті у фахових виданнях, матеріали конференцій, патенти та ДСТУ.*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Реферат. Вступ. Якість товстолистової сталі та способи її поліпшення. Вибір матеріалу та обгрунтування методики дослідження. Характеристика основних технологічних особливостей електрошлакового переплаву злитків листової сталі. Аналіз якості конструкційної листової сталі після електрошлакового переплаву. Охорона праці та техногенна безпека. Загальні висновки. Перелік джерел посилання.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Титульний лист – 1. Злам проби 50-мм листа – 1. Схема вирізки з листа стандартних проб на злам – 1. Сортамент великотоннажних листових злитків ЕШП і розміри електродів, що витрачають – 1. Схема печі ЭШП-20ВГ – 1. Схема біфілярної установки ЕШП. Хімічний склад сталі 15Х2Г2СВА. Властивості флюсу АНФ-6 – 1. Зміна середнього розміру включень по висоті злитків сталі 15Х2Г2СВА – 1. Розподіл неметалічних включень по висоті злитків із сталі 15Х2Г2СВА– 1. Механічні властивості товстолистового прокату із сталі 15Х2Г2СВА після ЕШП. Вміст домішкових елементів сталі 15Х2Г2СВА при різних

способах виплавки – 1. Забрудненість неметалічними включеннями сталі 15Х2Г2СВА при різних способах виплавки. Механічні властивості 40-мм листів із сталі 15Х2Г2СВА різних способів виплавки – 1. Загальні висновки – 2.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Якість товстолистової сталі та способи її поліпшення	*доцент О.С. Воденнікова*		
Вибір матеріалу та обгрунтування методики дослідження	*доцент О.С. Воденнікова*		
Характеристика основних технологічних особливостей електрошлакового переплаву злитків листової сталі	*доцент О.С. Воденнікова*		
Аналіз якості конструкційної листової сталі після електрошлакового переплаву	*доцент О.С. Воденнікова*		
Охорона праці та техногенна безпека	*доцент О.С. Воденнікова*		
Нормоконтроль	*доцент О.С. Воденнікова*		

7. Дата видачі завдання *27.12.2024 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Реферат. Вступ*	*17.02.2025-20.02.2025*	
2	*Якість товстолистової сталі та способи її поліпшення*	*21. 02.2025-17.03.2025*	
3	*Вибір матеріалу та обгрунтування методики дослідження*	*18. 03.2025-31.03.2025*	
4	*Характеристика основних технологічних особливостей електрошлакового переплаву злитків листової сталі*	*01.04.2025-05.05.2025*	
5	*Аналіз якості конструкційної листової сталі після електрошлакового переплаву*	*06.05.2025-27.05.2025*	
6	*Охорона праці та техногенна безпека*	*28.05.2025-07.06.2025*	
7	*Загальні висновки. Перелік джерел посилання. Графічна частина*	*08.06.2025-10.06.2025*	

Студент _____ *Кірілл ПІЩЕНКО*
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____ *Оксана ВОДЕННІКОВА*
(підпис) (ініціали та прізвище)

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

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 87 с., 22 рис., 7 табл., 29 джерел посилання.

ТОВСТОЛИСТОВА СТАЛЬ, ЕЛЕКТРОШЛАКОВИЙ ПЕРЕПЛАВ, ЗЛИТОК, РАФІНУВАННЯ СТАЛІ.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: Огляд технологічних особливостей електрошлакового переплаву зливків листової сталі.

Мета роботи – порівняльна оцінка якості листової сталі типу 15Х2Г2СВА після різних видів рафінуючого переплаву.

У розділі 1 приведено основні види дефектів листової сталі та зазначені причини їх виникнення.

У розділі 2 описані матеріали і методи досліджень технології електрошлакового переплаву зливків листової сталі.

У розділі 3 приведені основні конструкційні особливості установок і схеми ЕШП.

У розділі 4 проведено порівняння якості конструкційної листової сталі після ЕШП.

У розділі 5 приведені основи охорони праці та техногенної безпеки.

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

ЗМІСТ

ВСТУП……7
1 ЯКІСТЬ ТОВСТОЛИСТОВОЇ СТАЛІ ТА СПОСОБИ ЇЇ ПОЛІПШЕННЯ....9
1.1 Аналіз дефектів будови злитка при кристалізації його у виливниці……....9
1.2 Основні дефекти листової сталі та вимоги до її якості……...12
1.2.1 Характеристика основних видів дефектів зламу листової сталі……....13
1.2.2 Вплив неметалічних включень на властивості сталі……...16
1.3 Аналіз сучасного стану виробництва листової сталі і основних методів поліпшення її якості……20
1.4 Висновки……24
2 ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ……...26
2.1 Метод випробування сталі на злам……....26
2.2 Методика дослідження злитків електрошлакової листової сталі……..27
2.3 Методика дослідження оцінки якості сталі після електрошлакового переплаву……30
2.4 Висновки……..….32
3 ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ ЗЛИТКІВ ЛИСТОВОЇ СТАЛІ……33
3.1 Основні схеми і варіанти ЕШП ……33
3.2 Особливості процесів рафінування сталі при ЕШП……39
3.3 Особливості ЕШП великолистових злитків ……43
3.4 Особливості виробництва електрошлакової листової сталі…….……..52
3.5 Висновки……59
4 АНАЛІЗ ЯКОСТІ КОНСТРУКЦІЙНОЇ ЛИСТОВОЇ СТАЛІ ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ……60
4.1 Особливості виплавки початкової сталі для ЕШП……..60
4.2 Вплив параметрів плавки ЕШП на якість злитка……64

4.3 Оцінка якості сталі після електрошлакового переплаву ……67
4.3.1 Оцінка забрудненості сталі…….……67
4.3.2 Оцінка механічних властивостей сталі……..67
4.4 Порівняльна оцінка якості листової сталі типу 15Х2Г2СВА після різних видів рафінуючого переплаву……..70
4.5 Висновки……..…...76
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА……..…..77
5.1 Фактори небезпеки в цехах ЕШП…….…77
5.2 Техногенна безпека в цехах ЕШП…….....80
5.3 Висновки……..81
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……..82
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ……..…...84

ВСТУП

Відповідно до основних напрямів розвитку народного господарства перед металургійною галуззю поставлені великі завдання корінного поліпшення якості металопродукції, що дозволяють без істотного збільшення об'ємів виробництва підвищити якість металу і терміни служби машин, що виготовляються з нього, а також виробів. Значна роль при цьому відводиться спеціальній електрометалургії, зокрема виробництву великотоннажних листових злитків (ВЛЗ) способом електрошлакового переплаву (ЕШП), з яких отримують великогабаритний товстолистовий прокат відповідального призначення. Постійно існуюча потреба у високоякісному товстолистовому прокаті визначає необхідність дослідження досконаліших технологічних і металургійних підходів в електрошлаковій технології.

Якість сталі надає весь більший вплив на підвищення ефективності використання промислової продукції в народному господарстві. Про необхідність підвищення якості металу, його характеристик міцності, стійкості, довговічності, надійності та інших службових властивостей свідчить, зокрема, той факт, що в даний час біля четвертої частини металу, споживаного в машинобудуванні і металообробці, витрачається на ремонт існуючого парку машин, устаткування та інших засобів виробництва. Тому виплавка сталей і сплавів вищої якості дозволить проводити вироби з тривалішим терміном служби.

В даний час ЕШП застосовують при виробництві тонко- і товстолистових сталей практично всіх структурних класів. Проте особливо ефективним виявилося застосування ЕШП при виробництві товстолистових сталей. Пояснюється це тим, що вірогідність появи найбільш типового дефекту листової сталі – розшарувань підвищується із збільшенням товщини металу. Наявність розшарувань в металі (особливо високій міцності) може з'явитися причиною крихкого руйнування конструкції. Не менш важливого при збільшенні товщини металу зберегти і високий рівень механічних властивостей

за товщиною листової сталі. Інакше вірогідність утворення в металі зварної конструкції так званих ламелярних тріщин, які також можуть стати вогнищами зародження крихкої тріщини, істотно зростає. Тому отримання якісного великотоннажного листового злитка-заготівки під плющення на товстий лист і плити – одне з найважливіших завдань чорної металургії. До теперішнього часу найбільш вдалим вирішення проблеми отримання високоякісного великотоннажного листового злитка є застосування ЕШП.

Найбільш важливою перевагою товстолистового металу ЕШП в порівнянні з металом відкритої дугової виплавки є його вищі механічні властивості. Результати досліджень показали, що в товстолистовому металі ЕШП практично відсутня анізотропія властивостей по перетину листа. При цьому, якщо характеристики міцності листової сталі до і після ЕШП приблизно однакові, пластичні властивості металу ЕШП набагато вищі, особливо за товщиною листа.

Для виготовлення великої групи зварних апаратів, судин високого тиску, суднових корпусів, кожухів доменних печей, мостів і інших відповідальних конструкцій технічно доцільно і економічно вигідне використання низько - і середньолегованих сталей підвищеної або високої міцності. Разом з тим застосування ЕШП найефективніше для високоміцних товстолистових легованих сталей. Це пов'язано з тим, що підвищення характеристик міцності сталі, як правило, пов'язано з підвищенням чутливості сталі до гострих надрізів і тріщин та зниженням її стійкості проти крихкого руйнування. Серед засобів, що забезпечують підвищення стійкості сталі проти дії до ламкості концентраторів напруги, одним з найбільш ефективних є підвищення її металургійної якості за рахунок ЕШП. Саме тому переважна більшість робіт, проведених в області ЕШП листових сталей останнім часом, присвячене товстолистовим низько- і середньолегованим сталям підвищеної і високої міцності [1–3].

1 ЯКІСТЬ ТОЛСТОЛІСТОВОЇ СТАЛІ ТА СПОСОБИ ЇЇ ПОЛІПШЕННЯ

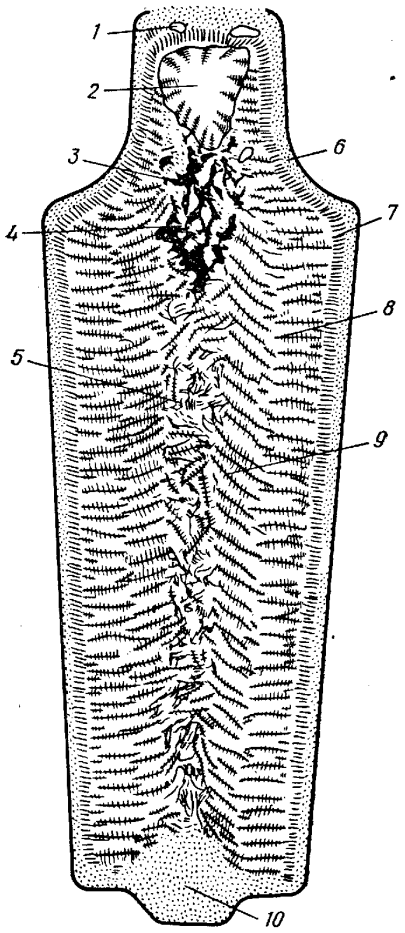
1.1 Аналіз дефектів будови злитка при кристалізації його у виливниці

В процесі розливання легованої сталі і кристалізації металу в звичайних чавунних виливницях з футерованими прибутковими надставками утворюються численні дефекти поверхні і макроструктури злитка. Так, наприклад, на поверхні таких злитків можна виявити подовжні і поперечні тріщини, плени, завороти, підкіркові міхури (що виявляються при зачистці або обдиранні злитків), навари чавуну і тому подібне До внутрішніх дефектів відносяться усадкова раковина і усадкова пористість, зональна ліквація (нерівномірний розподіл елементів), міжкристалічні тріщини, газові міхури, білі плями, плямиста ліквація, грубі скупчення неметалічних включень і тому подібне Багато хто з цих дефектів виникає вже при невеликих відступах від заданої технології, деякі є характерними для виробництва відповідних груп сталей, маси і форми злитка.

Кристалізація злитка у виливниці відбувається таким чином: в процесі розливання сталі (підйомі рівня металу у виливниці) і після закінчення розливання в результаті сильної охолоджуючої дії стінок виливниці утворюється кіркова поверхнева зона злитка з дрібними рівновісними кристалами. У міру збільшення товщини кірки, зменшення тепловідводу при утворенні зазору між кіркою злитка і виливницею (зазор утворюється унаслідок усадки металу при кристалізації), а також в результаті нагріву самої виливниці охолоджування рідкої сталі зменшується. У цих умовах починається зростання стовбчастих кристалів в напрямі, зворотному тепловому потоку, тобто майже перпендикулярно стінці виливниці. Потім зростання стовбчастих кристалів сповільнюється і утворюється двофазна зона, що включає “напівтверді” ділянки з скелетів дотичних кристалів, які примикають до об'єму, що повністю закристалізовувався, і напіврідкі ділянки, де в рідкому металі утворюються

відособлені кристали. У цій зоні і відбувається потім об'ємна кристалізація всього металу. Тяжкість, що опускається під дією сили, кристали поступово створюють в нижній частині злитка “конус осадження”.

У злитках легованої конструкційної сталі масою 2,5. –4,5 т кіркова зона дрібних кристалів має товщину 6–8 мм, зона стовбчастих кристалів, нахилених на 16–18° до верхньої частини злитка, 70–80 мм. У осьовій частині розташована зона рівновісних кристалів, розмір яких зростає від низу злитка до верху з 10 до 80–100 мм (по головній осі). Характерний вид макроструктури злитка спокійної сталі представлений на рис. 1.1.



1 – міст над усадковою раковиною; 2 – усадкова раковина; 3, 4 – порожнечі і рихлість; 5 – зона різноорієнтованих кристалів; 6 – кіркова зона; 7, 8 – зони стовбчастих кристалів; 9 – стовбчасті кристали, направлені до теплового центру; 10 – “конус осадження”

Рисунок 1.1 – Характерний вид макроструктури злитка спокійної сталі

Об'єктивною закономірністю кристалізації є наявність в злитках зональної і дендритної (внутрішньо кристалічної) хімічної ліквації, а у ряді сталей і фазовій ліквації. Особливо інтенсивно ліквірують вуглець, фосфор і сірка, які мають різну розчинність в твердому і рідкому залізі.

У нижньому і середньому горизонтах злитка в осьовій частині вміст вуглецю. Фосфору і сірки нижче на 5–10% середнього вмісту, а в поверхневій зоні відповідно вище. У підприбутковій частині спостерігається зворотна залежність: найбільш велика позитивна ліквація по осі злитка в так званому тепловому центрі злитка. Явище ліквації викликає значні коливання в механічних властивостях стали, приводить до утворення внутрішніх дефектів металу і ускладнює переділ злитків, збільшуючи їх схильність до перепалу (температура плавлення ділянок металу, збагачених вуглецем, кремнієм, марганцем, нижче, ніж інших ділянок злитка).

Дендритна ліквація (внутрішньо кристалічна неоднорідність) є результатом неоднакової розчинності елементів в твердій і рідкій фазі і завжди виявляється в сталі. Ступінь цієї ліквації на середині радіусу злитка, за даними І.Н. Голікова, складає для сірки і фосфору 150–200%, вуглецю, вольфраму, ванадію і молібдену 40–60%, кремнію, хрому, марганцю 15–20%, нікелю 5%, при цьому ступінь ліквації збільшується від периферії до осі злитка.

Дендритна ліквація визначає полосчатість структури в деформованій сталі і пов'язану з нею анізотропію механічних властивостей (високі значення пластичних властивостей в зразках уздовж напряму волокна і майже в два рази нижче в зразках упоперек напряму волокна).

У останній період кристалізації в центральній зоні злитка за наявності «моста» кристалів, що зверху утворився, відбувається поява усадкових пір, які в деформованому металі оцінюються як центральна пористість. Підсилюють розвиток центральної пористості елементи, що збільшують усадку при твердінні (вуглець, кремній, марганець).

У сталей з низьким вмістом вуглецю осьова пористість розвинена слабо, але спостерігаються іноді замість пористості міжкристалічні або

“павукоподібні” тріщини.

Розглянуті особливості кристалізації металу у виливниці показують, що із збільшенням маси злитка і відповідно об'єму рідкого металу зростає кількість дефектів, пов'язаних з ліквацiйними явищами і усадкою. Значно зростає і кількість дефектів, пов'язаних з умовами розливання металу. Тому не випадково, що на металургійних заводах основну масу високоякісної легованої сталі відливають в злитки масою 1–5 т. Крупніші злитки (до 7–20 т) отримують для подальшого переділу на лист, де в результаті великих обжимань вдається зменшити дію дефектів, пов'язаних з твердінням металу у виливниці. Ще крупніші злитки відливають для отримання великих поковок роторів і тому подібне При цьому для отримання придатних виробів доводиться видаляти в обріз та стружку значну кількість металу. Ряд нових підвищених вимог до якості металу взагалі не може бути забезпечений при розливанні сталі у виливниці, не дивлячись на деякі удосконалення операції розливання сталі (позапічна дегазація, розливання з екзотермічними і теплоізоліруючими сумішами, електрообігрів головної частини злитків і т. п.) [4–6].

1.2 Основні дефекти листової сталі та вимоги до її якості

Відомо, що якість листових злитків залежить від ступеня розвитку металургійних дефектів, що виникають при виплавці металу і кристалізації злитка. До таких дефектів, в першу чергу, можна віднести дендритну неоднорідність, зональну ліквацію, підвищену забрудненість неметалічними включеннями і газами. Із збільшенням легування стали перерахованими дефектами виражені сильніше у зв'язку із збільшенням рідкого металу, зниженою здібністю до вирівнювання концентрації і тому подібне.

У свою чергу, дефекти в металі злитка визначають якість катаної сталі і впливають на її фізико-механічні та службові властивості. Одним з методів оцінки якості металу є вивчення характеристик виду зламу. До найважливіших характеристик зламу відносять шиферність, розшарування, древовидність,

дендридність і флокени.

Слід зазначити, що шиферність і розшарування практично не усуваються ніякими засобами термічної обробки металу, включаючи і дифузійний відпал. Таким чином, шиферність і розшарування катаної сталі характеризують металургійну якість металу.

1.2.1 Характеристика основних видів дефектів зламу листової сталі

Dище перелічені основні дефекти зламу листової сталі можна визначити відповідно до того, як вони представляються неозброєному оку.

Шиферний злам – це численні порушення металу в зоні його зламу, що володіють відносно невеликою протяжністю як уздовж поверхні розділу (зламу, так і в глибину від цієї поверхні; в результаті злам набуває дрібношаровий, а нерідко навіть шарувато-ступінчастий вигляд (рис.1.2).



Рисунок 1.2 – Шиферний злам проби 50-мм листа (низ злитка)

Зазвичай порушення суцільності при шиферному зламі характеризується присутністю невеликих і тісно розташованих як уздовж поверхні зламу дрібних розшарувань, площина яких паралельна поверхні листа, а довжина їх не перевищує 10 мм.

Встановлено, що шиферність властива тільки для катаної сталі і схильність катаного металу до шиферності зростає із збільшенням маси злитка і ступеня деформації. Як відомо, причиною шиферного зламу сталі є дендритна ліквація і забрудненість металу газами і неметалічними включеннями.

Розшаруванням є порушення суцільності металу в зоні його зламу, що має велику протяжність як уздовж поверхні зламу (паралельно поверхні листа), так і в глибину від цієї поверхні розділу (рис. 1.3).

Як правило, площина розшарувань паралельна поверхні листа, але в окремих випадках (у листах дуже великої товщини) ця паралельність може бути спотворена. При значному числі великих розшарувань (5–10 шт.) злам приймає вид великошарового. Цей вид зламу відрізняється від дрібношарового або шиферного незрівнянно значнішою протяжністю розшарувань, при якій багато хто з них перетинає все поле зламу.

Наявність розшарувань пов'язана з ліквацією, головним чином, сірі і фосфору і, мабуть, збагаченням ліквацийних зон цих елементів неметалічними включеннями. Тому розшарування сталі, що деформується, спостерігаються, як правило, тільки в головній частині листового прокату.

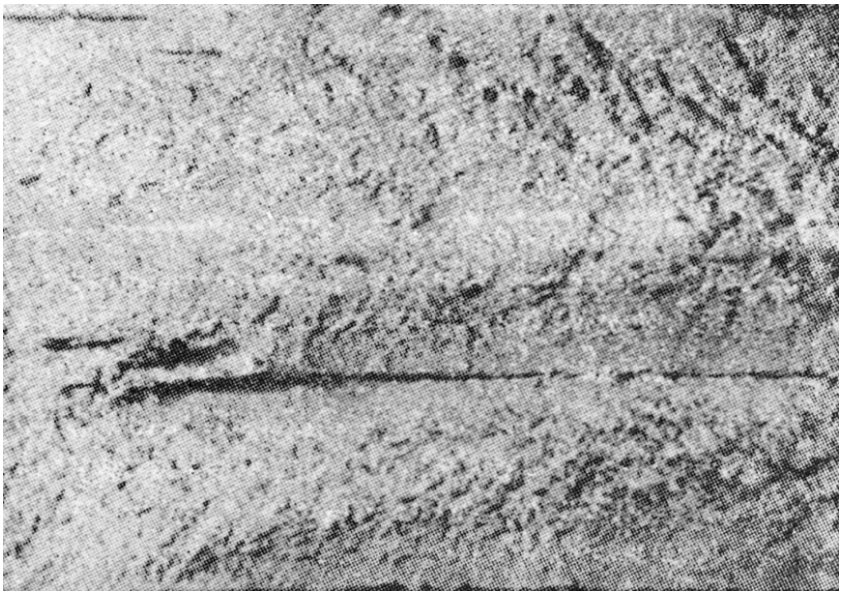


Рисунок 1.3 – Розшарування в зламі проби 50-мм листа (верх злитка)

Древовидність на відміну від попередніх пороків зламу не є видимими

порушеннями суцільності металу в глибину від поверхні зламу і представляється на останній (при слабкому розвитку цього пороку) лише у вигляді численних блискучих штрихів, розташованих паралельно поверхні листа (рис .1.4), а при сильному розвитку – у вигляді пластинчасто-волокнистої будови поверхні зламу, що нагадує будову гнилого дерева при зламі уздовж його волокон.

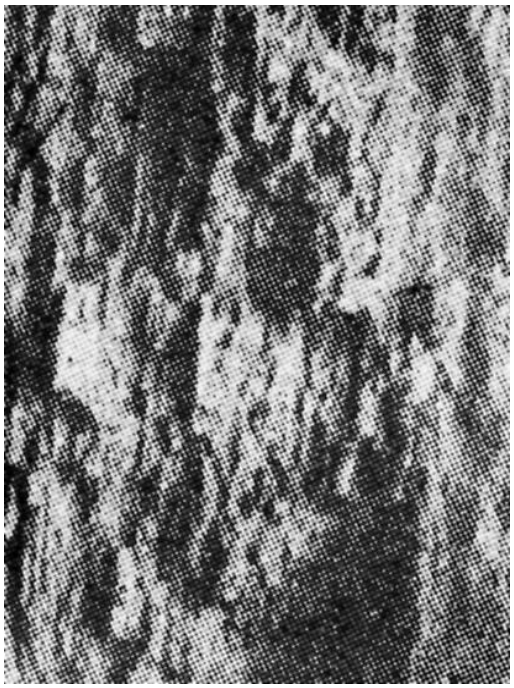


Рисунок 1.4 – Древовидність в зламі проби 50-мм листа

Дендритність в зламі прокатаної сталі, представляючи залишки недостатньо деформованих первинних кристалів, виявляється на поверхні зламу у вигляді:

а) невеликих розшарувань з плоскими стінками, які на відміну від звичайних розшарувань безладно орієнтовані під різними косими кутами до поверхні листа;

б) гострокутних виступів, також різноорієнтованих;

в) уламків сильно витягнутої форми, зазвичай розташованими під гострими кутами до поверхні зламу, що володіють світлішими відтінками, ніж навколишній сірий фон волокнистої будови зламу, і що нагадує як би

чужорідні включення (рис.1.5).

Флокени є порушеннями суцільності металу, що мають форму світлих плям округлої форми, які різко виділяються своїм кристалічним блиском на темно-сірому фоні решти поверхні волокнистого зламу.

Площина флокенів може бути орієнтована різним чином по відношенню до поверхні листів, але найчастіше вона залишається паралельною останньою. Тому в зламах поперечних і подовжніх проб Флокени мають вид дрібних розшарувань, що додають зламу характер шиферного (рис. 1.6). Оскільки Флокени є порушеннями суцільності металу, що існують в листі до поломки проби, то при кристалічній будові поверхні зламу флокени не маскуються і представляються у вигляді дрібних розшарувань.

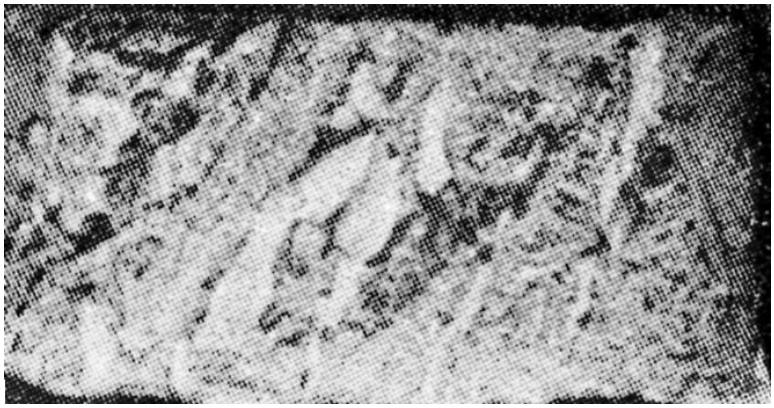


Рисунок 1.5 – Дендритність в зламі проби 50-мм листа

1.2.2 Вплив неметалічних включень на властивості сталі

Основну масу неметалічних включень в сталі складають оксидні і сульфідні включення. Залежно від складу стали і способу її розкислювання ці включення можуть мати різний склад і властивості. Відомо чотири типи сульфідних включень у вуглецевій сталі, що утворюються залежно від залишкового змісту алюмінію, що використовується як розкислювач. При змісті алюмінію менше 0,005% з'являються кулясті оксисульфідні включення складного складу, в утворенні яких беруть участь всі елементи, присутні в сталі

(тип 1).



Рисунок 1.6 – Флокени в зламі поперечної проби 50-мм листа

Ці включення рівномірно розподілені в об'ємі литої сталі і трохи впливають на зниження механічних властивостей литої сталі. При змісті алюмінію в межах 0,005–0,020% утворюються включення 2-го типу, що є сульфідом MnS, який у вигляді ланцюжків виділяється по межах зерен, різко погіршуючи механічні властивості сталі. Несприятлива дія цих включень посилюється при плющенні сталі, оскільки вони, будучи високопластичними, витягуються в строчки. При вмісті алюмінію більше 0,020% сульфідна фаза виділяється у вигляді MnS багатогранної форми (тип 3). В порівнянні з включеннями 2-го типу ці включення менш небезпечні для литої сталі. Проте при плющенні вони так само, як і включення 2-го типу витягуються у напрямі плющення, істотно знижуючи ізотропну стали. Якщо для остаточного розкислювання окрім алюмінію застосувати рідкоземельні метали (РЗМ) або силікокальцій, то багатогранне включення 3-го типу трансформується в кулясті

включення, подібні до 1-го типу, але що відрізняються від них по складу. Такі включення виділяються із сталі як рідка оксисульфідна фаза, основну частину якої складають сульфіди рідкоземельних металів (РЗМ). Це 4-й тип включень. Він теж несприятливий з погляду механічних властивостей металу.

Аналогічним чином можна класифікувати і оксидні включення (за винятком включень типу 2). Зустрічаються гетерогенні круглі включення, відповідні типу 1; кристалічні багатогранні включення (Al_2O_3, TiO_2 та ін.), близькі до типу 3; скупчення Al_2O_3 відповідні типу 4.

Якщо для литої сталі найбільше значення мають склад і морфологія сульфідних включень, то для властивостей катаної сталі важливіші оксидні включення. Пояснюється це роллю деформаційної здатності неметалічних включень. Якщо в процесі обробки тиском неметалічні включення подовжуються менше, ніж сталь, на межі їх розділу виникає напруга. Для оцінки деформаційної здатності включень служить показник, залежний від співвідношення деформованості металу матриці і включення. При показнику, рівному одиниці, неметалічні включення подовжуються, як сталь. Напруги на межі їх розділу в процесі плющення не змінюються. Самі включення приймають еліптичну форму і не розриваються. При зниженні показника деформованості включення не подовжуються рівномірно з металевою матрицею. На межі розділу фаз виникає напруга, яка може викликати тріщини.

Таким чином, неметалічні включення зменшують суцільності сталі та утворюють місця з високою вірогідністю утворення мікротріщин. За відповідних умов ці мікротріщини можуть з'єднуватися і утворювати тріщини критичного розміру, що приводять до руйнування.

Рівень концентрації напруги в сталі, викликаний неметалічними включеннями, залежить від когезії неметалічних включень і основного металу; різниці у властивостях між неметалічними включеннями і основним металом (за деформованістю, коефіцієнтом термічного розширення і так далі); форми, розмірів неметалічних включень і відстані між ними; кількості включень.

Слід також врахувати, що не у всіх випадках досягнення мінімального

залишкового вмісту і сприятливого розподілу включень по розмірних групах і в об'ємі металу служить гарантією високої металургійної якості металу. Часто не менше, а у ряді випадків більше значення, мають характер включень, що залишаються, і склад, що визначає їх властивості.

Особливий вплив неметалічні включення роблять на макроструктуру відливання сталі. Численними дослідженнями встановлено, що підвищена концентрація неметалічних включень супроводжує, як правило, зони макроскопічної ліквації. При цьому найменшу кількість включень має кіркова зона злитка. Скупчення неметалічних включень спостерігається в кінці зони транскристалізації. Підвищену кількість неметалічних включень як сульфідів, так і оксидів спостерігають в зоні Л–образної ліквації. Підвищений вміст сульфідів наголошується в зоні V–образної ліквації, в головній частині злитка, в осьових об'ємах, що поволі твердіють, стали. Утворення скупчень оксидних включень наголошується в донній частині злитка в конусі осадження.

Утворення різних типів включень в окремих зонах кристалізації свідчить про участь включень в процесі кристалізації. Дослідженнями встановлено, сульфідні включення розташовуються в основному в міждендритному просторі, де розташовуються також високоглиноземисті включення. Глобулярні включення розташовуються головним чином на осях дендритів. Ближче до осей дендритів розташовуються і нітриди титану. Це свідчить про те, що подібного роду включення виступають як центри кристалізації, тоді як значення сульфідів і високоглиноземистих включень у якості центрів кристалізації дуже мало.

Виходячи з викладеного ясно, що дисперсність дендритної структури литого металу знаходиться в певній залежності від розмірів більшості неметалічних включень, що знаходяться або утворюються у відливанні. Чим вище дисперсність дендритної структури, тобто чим менше відстань між осями дендритів, тим дрібніше неметалічні включення [5–9].

1.3 Аналіз сучасного стану виробництва листової сталі і основних методів поліпшення її якості

Сталевий лист – основний конструкційний матеріал, масштаби застосування якого в сучасній промисловості і будівництві постійно ростуть. Він застосовується в суднобудуванні, авіації, енергетичному і нафтохімічному машинобудуванні, індустріальному будівництві і так далі.

Одним з основних шляхів підвищення механічних і службових властивостей металу є підвищення загальної чистоти металу від шкідливих домішок, неметалічних включень і газів. Вирішальний вплив на якість готового листа, його технологічні і експлуатаційні властивості надають умови переділу.

При звичайних способах виплавки спеціальних сталей (в мартенівських і дугових сталеплавильних печах, а також в кисневому конвертері) і при подальшому розливанні металу у виливниці або безперервнолиті заготовки вони уражені такими дефектами як зональна хімічна і фазова ліквація, міждендритні рихлості, міхури, плени, внутрішні та поверхневі тріщини. Ці дефекти служать причиною грубих розшарувань, крупних скупчень неметалічних включень, волосовин, флокенів, шиферного зламу та інших дефектів в листі. Наявність цих дефектів викликає різке зниження пластичних властивостей, підвищує анізотропію, знижує стійкість виробів із сталі проти крихких руйнувань, особливо при низьких температурах і знакозмінних навантаженнях, в агресивних середовищах.

Аналіз сучасного стану виробництва легованої сталі вказує на тенденцію проведення завершальних операцій розкислювання, остаточного рафінування і легування поза сталеплавильним агрегатом. У практиці сталеплавильного виробництва широке застосування отримали методи позапічної обробки рідкої сталі: обробка металу в ковші рідким синтетичним високоосновним глиноземистим шлаком, продування рідкої ванни інертними газами і порошкоподібними матеріалами, вакуумування стали в ковші або виливниці з одночасним продуванням аргоном, використання для легування рідкої лігатури

та ін. Проте, не дивлячись на очевидні переваги вищезгаданих методів, застосовність звичайних злитків або навіть безперервнолитих заготовок, з характерною хімічною і фізичною неоднорідністю, для виготовлення з них високоякісного товстолистового прокату залишається проблематичною.

Така ситуація викликала необхідність дослідження в металургії способів, що дозволяють понизити забрудненість металу шкідливими домішками, газами і неметалічними включеннями при одночасному поліпшенні структури злитка.

Найбільш ефективними способами підвищення якості конструкційних сталей, зокрема вживаних для виготовлення листів, є нові способи спеціальної електрометалургії – електрошлаковий (ЕШП), вакуумно-дуговий (ВДП) і електронно-променевий (ЕПП) переплави.

Вакуумно-дуговим переплавом (ВДП) є переплав електродів заданого хімічного складу, що витрачаються, під вакуумом в металеві водоохолоджувані кристалізатори і здійснюється в печах ВДП.

Стартовий період плавки ВДП полягає в тому, що між торцем електроду, що витрачається, поміщеного у вакуумну камеру, і приманкою, укладеною на піддон кристалізатора, збуджується електрична дуга. За рахунок тепла, що виділяється при горінні дуги, торець електроду починає оплавлятися. Краплі рідкого металу, що утворюються, падають на дно кристалізатора і скупчуються тут у вигляді рідкої металевої ванни. Надалі горіння дуги підтримується між торцем електроду, що витрачається, і поверхнею рідкого металу. З рідкої металевої ванни, що утворюється, поступово по ходу переплавки формується злиток сталі.

В процесі переплавки перебування рідкого металу у вакуумі при високих температурах обумовлює інтенсивне рафінування його від газів, шкідливих домішок і неметалічних включень. Рафінування здійснюється завдяки дисоціації, відновленню вуглецем і спливання з об'єму рідкої металевої ванни неметалічних включень, шляхом десорбції газів і випаровування легко летючих домішок. Процеси рафінування протікають в плівці рідкого металу на торці електроду, що витрачається, в краплі при її падінні, на поверхні і в об'ємі рідкої

металевої ванни. Ступінь рафінування металу визначається головним чином ступенем розрідження в робочому просторі печі і силою струму (швидкістю плавлення).

Електронно-променевий переплав (ЕПП) є вакуумним переплавним процесом і, з металургійної точки зору, подібний ВДП. Відмінність полягає в тому, що при ЕПП джерелом енергії служить потік швидких електронів, при бомбардуванні якими поверхонь електроду, що розплавляється, і металевого розплаву, що нагрівається, їх кінетична енергія у момент удару об поверхню перетворюється на тепло, за рахунок якого відбувається оплавлення електроду і нагрів рідкої металевої ванни. Такий спосіб нагріву і плавлення забезпечує високу концентрацію теплової енергії безпосередньо на поверхні об'єкту, що розплавляється або нагрівається, і високу ефективність її використання. Регулюючи потужність випромінювання і управляючи переміщенням потоку швидких електронів, можна практично в будь-яких співвідношеннях перерозподіляти його енергію між торцем електроду, що витрачається та оплавляється, і рідкої металевої ванни, забезпечуючи гнучке регулювання технологічних параметрів переплавки.

Переплавка сталі здійснюється в основному на установках ЕПП з електронно-променевими гарматами, основним елементом яких є джерело випромінювання – електронно-променева гармата (одна або декілька), що фокусує і відхиляє промінь, електронно-магнітні системи, вакуумна камера і шлюзові камери для подачі електродів, що витрачаються, в зону плавлення. Електрод, що витрачається, встановлюють у вакуумній камері торцем над порожниною кристалізатора. Після включення печі сфокусований електронний промінь починає оплавляти торець електроду, що витрачається, і краплі рідкого металу, що утворюються, падають в кристалізатор, утворюючи ванну рідкого металу. Промінь, переміщаючись за заданою програмою, бомбардує поперемінно торець електроду, що витрачається, забезпечуючи його подальше оплавлення, і поверхню рідкої металевої ванни, підтримуючи температуру розплаву на заданому рівні. У міру наплавлення і кристалізації металу

формується злиток сталі.

На відміну від ВДП, при якому залишковий тиск в зоні плавки за умовами стійкого горіння електричної дуги не може бути нижче за рівень 10 – 15 Н/м^2, при ЕПП в робочому просторі печі підтримується істотно глибший вакуум (0,01 – 0,001 Н/м^2). Крім того, висока концентрація енергії в електронному промені, можливість управляти його переміщенням і регулювати режими роботи джерела випромінювання в широкому діапазоні і незалежно від ходу переплавки дозволяють забезпечувати значний перегрів і тривале перебування рідкого металу у вакуумі. Все це обумовлює можливість глибокого рафінування металу при ЕПП і робить цей вид переплавки найбільш ефективним способом рафінування сталі від газів, неметалічних включень і шкідливих домішок кольорових металів.

Електрошлаковий переплав (ЕШП) полягає в переплавці електродів, що витрачаються, певного хімічного складу під шаром високоактивного шлакового розплаву – флюсу, у водоохолоджуваних металевих кристалізаторах. ЕШП починається з наведення в кристалізаторі рідкої шлакової ванни, як правило, шляхом заливки в нього розплавленого флюсу, приготованого в окремій плавильній ємкості. У шлакову ванну, що утворилася, заглиблюються торці електродів, що витрачаються, послідовно включених у вторинну обмотку пічного трансформатора; між ними виникає електричний струм і починається процес переплавки. Торці електродів, що витрачаються, починають оплавлятися за рахунок тепла (в Дж), що виділяється в шлаковій ванні при проходженні електричного струму. Краплі рідкого металу, що утворюються на них, проходять через шлаковий розплав і скупчуються в кристалізаторі у вигляді рідкої металевої ванни, з якої поступово, у міру наплавлення і кристалізації металу, формується злиток. Рафінування металу при ЕШП відбувається завдяки дисоціації і фізико-хімічній взаємодії неметалічних включень з шлаком, їх спливання з об'єму рідкої металевої ванни, в результаті протікання електрохімічних реакцій, а також унаслідок випаровування легколетучих домішок. Процеси рафінування протікають в

плівці рідкого металу на торці електроду, що витрачається, що оплавляється, в краплі рідкого металу при її проходженні через шлак, на межі розділу шлакової і металевої ванн і в об'ємі рідкої металевої ванни. Ступінь рафінування залежить головним чином від фізико-хімічних властивостей вживаного флюсу і швидкості наплавлення злитка.

При всіх переплавних процесах створюються виключно сприятливі умови для отримання високоякісних злитків. Злиток формується тут поступово, у міру наплавлення металу і кристалізації його з рідкої металевої ванни обмежених розмірів. Кристалізація протікає у водоохолоджуваних металевих кристалізаторах за наявності достатньо могутнього і концентрованого джерела тепла на поверхні рідкої металевої ванни. Все це забезпечує високий градієнт температур в рідкому металі і на межі розділу фаз. А це у свою чергу обумовлює направлену кристалізацію металу, малу протяжність області двофазного стану стали і нетривалий час перебування металу в ній. Завдяки цим обставинам створюються сприятливі умови для живлення рідким металом об'ємів злитка, що твердіють, а ліквацийні процеси не отримують скільки-небудь помітного розвитку. Все це забезпечує отримання злитків з щільною, бездефектною макроструктурою і високою фізико-хімічною однорідністю металу.

Чистота металу рафінуючого переплаву за шкідливими домішками, газами і неметалічними включеннями і високої якості злитків переплавних процесів дозволяють отримувати цими способами високоякісні металургійні заготовки і забезпечувати високу надійність і працездатність виробів, що виготовляються з них [10–12].

1.4 Висновки

1. Розглянуто сучасні способи поліпшення якості товстолистової сталі та визначено основні чинники, які впливають на якість сталі. Визначено, що серед основних дефектів листової сталі є шиферність, розшарування, древовидність,

дендридність і флокени.

2. Встановлено, що різні види розшарувань в товщині листа в основному пов'язані з дефектами, що утворюються в злитку сталі в результаті ліквацийних процесів, утворення газових міхурів та інші. Найбільш ефективним способом усунення подібних дефектів сталевого злитка, а отже і зниження вірогідності утворення розшарувань в листовій сталі після плющення, є переплав злитків великолистової сталі методом електрошлакового переплаву.

2 ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Метод випробування сталі на злам

Для оцінки якості сталі при її виготовленні і особливо в стані постачання у вигляді листів застосовується метод випробування на злам.

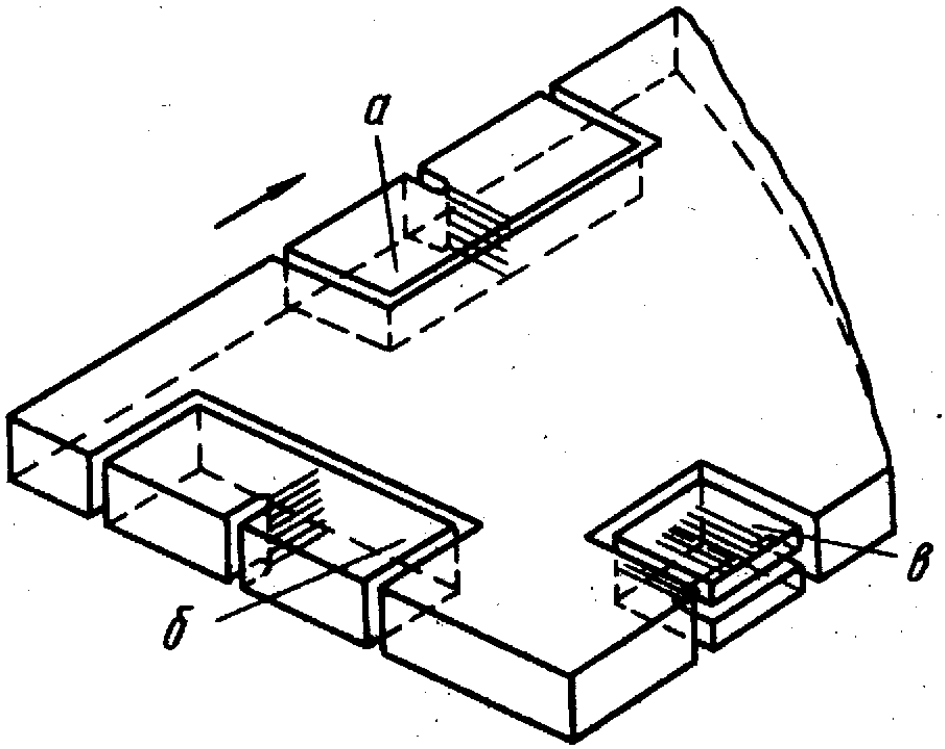
Необхідність дотримання одноманітних прийомів випробування на злам була врахована у вітчизняному виробництві листів, контрольованих по шиферному зламу і розшаруванням, шляхом розробки певних правил вирізки проб з листів, способів їх поломки і деяких інших умов випробування, зокрема температурних.

Є дослідження, в якому встановлено, що в сталі, схильній до утворення шаруватості (шиферного зламу), прояв цієї шаруватості частковий або навіть повністю може бути замасковано, якщо при випробуванні на злам виявляється зерниста (кристалічне) будова отримуваного зламу. При цьому автором роботи було сформульовано основну вимогу: листи, з яких вирізують зразки для випробування на злам, заздалегідь слід перевести відповідною термічною обробкою в стан, при якому після поломки вигином надрізаного зразка злам матиме волокнисту будову.

На рис. 2.1 представлена схема вирізки з листів стандартних проб на злам, де стрілка вказує напрям плющення, а штрихуванням показано розташування надрізів в пробних брусках.

Найбільш оптимальне співвідношення довжини пробного бруска до його товщини складає близько 1,5–2,0 (це відношення дійсне для листів завтовшки більше 5 мм). Вирізку проб з листів і виготовлення надрізів проводять автогенним різанням. Для контрольних випробувань рекомендовано застосовувати тільки поперечні проби. Поломку проб слід здійснювати під пресом, а не під копром, оскільки при цьому неминуча висока швидкість деформації металу, сприяюча отриманню кристалічного зламу. Випробування

на злам слід проводити при температурі проб і брусків в межах 15–25^{0}С.



а – подовжньо; б – поперечно; в – вертикально (на “розщеплювання”)

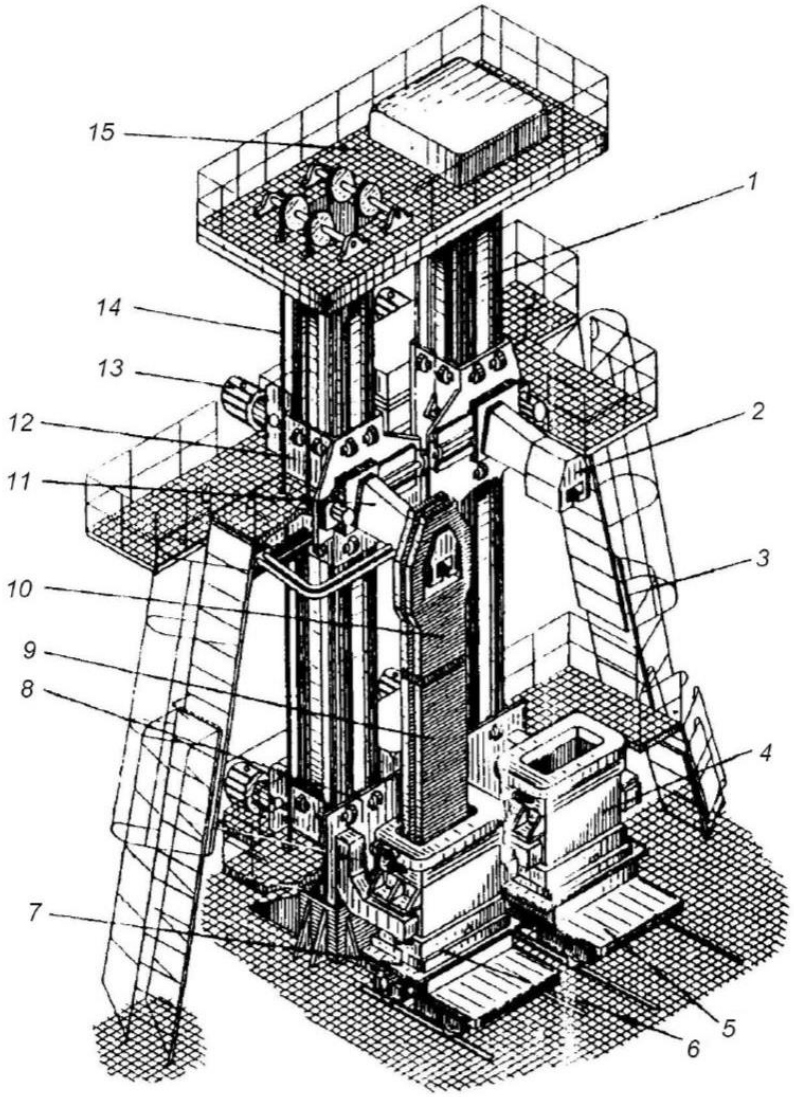
Рисунок 2.1 – Схема вирізки з листа стандартних проб на злам

2.2 Методика дослідження злитків електрошлакової листової сталі

Аналіз особливостей ЕШП великолистових злитків показав, що найбільше розповсюдження набули печі типу У-436 та ЕШП-20ВГ (рис. 2.2) (таблиця 2.1). Зазвичай використовуються листові злитки масою більше 10- – 14 тонн прямокутного перетину з широким діапазоном співвідношень ширини до товщини – від 1,8 до 6,3, і висотою від 1800 мм до 3000 мм, а іноді і більше.

Температура плавлення шлаків, вживаних при ЕШП конструкційних марок сталі, складає 1200 – 1450^{0}С. Основою більшості шлакових композицій, вживаних в технології ЕШП є фтористий кальцій CaF_2, для забезпечення необхідних технологічних і металургійних властивостей в шлак на основі фториду кальцію вводять високоміцні оксиди і інші добавки (Al_2O_3, CaO, MgO,

MgF_2 та ін.). Витрата шлаку при ЕШП великолистових злитків коливається в межах 40–50 кг/т сталі, зокрема 6–10 кг/т на утворення гарнісажу.



1 – колона; *2* –електродотримач; *3* – телескопічні сходи; *4* – кристалізатор; *5* – візок піддону; *6* – піддон; *7* – опорна рама печі; *8, 12* – каретка; *9* – електрод; *10* – інвентарна головка; *11* – рукав електродотримача; *13* – привід каретки; *14* – трос противоваги; *15* – рамма-майданчик

Рисунок 2.2 – Схема печі ЕШП-20ВГ

При ЕШП великолистових злитків застосовують переважно багатоелектродні біфілярні схеми струмопідводу. Максимальні температури

шлакової ванни (1655 – 1680^{0}С) спостерігаються в зазорі між електродами.

При розробці технології переплаву сталі кожної конкретної марки в злиток певного перетину і висоти складають програму вимірювання електричних параметрів (сили струму і напруги) протягом плавки, що забезпечує отримання оптимального об'єму і форми металевої ванни в кожен момент плавки.

Таблиця 2.1 – Сортамент великотоннажних листових злитків ЕШП і розміри електродів, що витрачаються

Тип печі ЕШП	Розміри електродів, що витрачаються, мм	Витрати електродів, шт.
У-436	140х880х4900	2
	140х1120х4830	2
	140х1230х4850	2
ЕШП-20ВГ	160х800х5100	2
	160х800х5300	2
	160х650х6100	4
	160х800х5100	4

Після наплавлення злитка заданої висоти і маси приступають до виведення усадкової раковини. Про закінчення процесу судять по досягненню дзеркалом шлакової ванни нижнього рівня зливних патрубків кристалізатора або сплаву придатної частини електроду.

Закінчення плавки проводять таким чином: припиняють подачу електроду, при цьому живлення установки не відключають. Електрод витримують до повного оплавлення зануреної в шлак частини, що супроводжується поступовим зниженням сили струму до нуля і появою дугових розрядів між торцем електроду і поверхнею шлакової ванни. Потім електродотримач піднімають до виведення огарка електроду з кристалізатора, напругу відключають.

При виведенні усадкової раковини невеликих злитків (1–2 т) за 15–20 хв. до закінчення плавки знижують силу струму і напругу.

Для дослідження виробництва електрошлакової листової сталі використовували ковані та литі електроди, що витрачалися, відлиті в

спеціальну виливницю. В результаті ЕШП отримані ковальські злитки масою 12 т, які на пресі кували на браму масою 9,2 т, а потім прокатували на листи завтовшки 80 – 115 мм, масою 6 т, тобто витратний коефіцієнт від злитка ЕШП до листа ЕШП складає приблизно 2,0.

2.3 Методика дослідження оцінки якості сталі після електрошлакового переплаву

Оцінку якості сталі після електрошлакового проводили на прикладі конструкційної сталі марки 15Х2Г2СВА (таблиця 2.2). Початковий метал виплавляли в 100-т дуговій електропечі методом повного окислення із застосуванням газоподібного кисню і повним викачуванням окислювального шлаку. Рафінування металу здійснювалося під білим шлаком з попереднім розкислюванням в печі феромарганцем, феросиліцієм і алюмінієм (0,4 кг/т) і остаточним – в ковші алюмінієм в кількості 0,5 кг/т.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад сталі 15Х2Г2СВА

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	W	Cu
			не більше					
0,12-0,17	0,7-1,1	1,8-2,2	0,025	0,025	1,8-2,2	≤0,35	0,8…1,2	≤0,25

ЕШП проводили на установці Р-951 під флюсом АНФ-6 (таблиця 2.3) з розкислюванням шлаку по ходу переплавки порошком алюмінію в кількості 30 г через кожних 10 хв.

Таблиця 2.3 – Хімічний склад флюсу АНФ-6

Хімічний склад, %					$T_{пл}$, ^0C	γ, $Ом^{-1}·м$	W, кВ·год.
CaF_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SiO_2			
57-60	25-30	4-4,5	0,3-0,9	<2	1350	0,003-0,0035	1050

ВДП здійснювали на установці ДСВ-10Б при залишковому тиску в робочому просторі печі порядку 0,1 Н/м^2.

ЕПП здійснювали на устано-ці У-254 при розрядці 0,01–0,001 Н/м^2. Швидкості переплавки у всіх випадках підтримувалися практично однаковими.

Переділ всіх злитків здійснювали по одній технологічній схемі з плющенням на листи завтовшки 40 мм.

Зразки металу для різної оцінки відбиралися як від злитків, так і від листів.

Макроструктуру злитків вивчали шляхом зняття сірчаних відбитків і візуально на подовжніх осьових темплетах, вирізаних на відстані 20, 50 і 80% висот, після того, що труїть їх в соляній кислоті при температурі 50–60^{0}С.

Дисперсність дендритної структури оцінювали методом січною на поперечних і подовжніх площинах зразків, вирізаних з подовжніх темплетів на середині висоти злитків. Щільність литого металу визначали методом гідростатичного зважування на 10 зразках від злитка.

Хімічний склад сталі в злитках переплавних процесів контролювали в пробах головного, середнього і донного поперечних макротемплетів на периферії, в центрі і на середині радіусу, а в початковому злитку – по ковшовій пробі.

Проби для визначення вмісту неметалічних включень способом металографії відбирали по осі, на периферії і по середині радіусу злитків переплавних процесів – по середині їх висоти, а в початковому злитку – також на підприбутковому горизонті і на відстані 230 мм від донної частини. Вміст неметалічних включень фізико-хімічним способом визначали в пробах металу по осі злитків по середині їх висоти.

Забрудненість сталі різних способів виробництва неметалічними включеннями оцінювали способами металографії і фізико-хімічного. При способі металографії підрахунок об'ємного відсотка включень робився за наслідками проглядання нетруєних шліфів на мікроскопі “Неофорт-2” при 400-кратному збільшенні по 600 полям зору. При фізико-хімічному способі число і

склад включень визначали шляхом електролітичного розчинення зразків з подальшим хімічним аналізом виділеного осаду.

Проби для визначення вмісту неметалічних включень способом металографії відбирали по осі, на периферії і по середині радіусу злитків переплавних процесів – по середині їх висоти, а в початковому злитку – також на підприбутковому горизонті і на відстані 230 мм від донної частини. Вміст неметалічних включень фізико-хімічним способом визначали в пробах металу по осі злитків по середині їх висоти.

Проби з 40-мм листів для оцінки якості прокатаного металу (характеристики зламів) були узяті з верхньої і нижньої частин листів в межах середньої третини їх ширини. Злами листів, отриманих плющенням переплавленого металу, опинилися з щільною волокнистою будовою без яких-небудь ознак шиферності і розшарувань. Злами 40-мм листів, виготовлених з початкового металу, у верхній і нижній частинах мали грубу шиферность балу 3, а в пробі з верхньої частини листа в середній зоні зламу на 20% його площ ще і шиферність, що розкрилася.

Властивості визначали на п'ятикратних розривних зразках діаметром 6 мм і ударних зразках з надрізом Менаже. У подовжньому напрямі випробовували по два розривних і три ударні зразки на крапку, у вертикальному (перпендикулярному поверхні листа) – по три розривних.

2.4 Висновки

1. Аналіз особливостей ЕШП великолистових злитків показав, що найбільше розповсюдження набули печі типу У-436 та ЕШП-20ВГ. Зазвичай використовуються листові злитки масою більше 10-14 тонн прямокутного перетину з широким діапазоном співвідношень ширини до товщини – від 1,8 до 6,3, і висотою від 1800 мм до 3000 мм, а іноді і більше.

3 ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ ЗЛИТКІВ ЛИСТОВОЇ СТАЛІ

3.1 Основні схеми і варіанти ЕШП

Перевагою процесу ЕШП є використання для його здійснення змінного струму промислової частоти. Тому в основу промислових установок ЕШП закладені можливі електричні схеми одно - і трифазного змінного струму.

Схема простої печі ЕШП приведена на рис. 3.1. Це однофазна піч. Методика дослідження злитків електрошлакової листової сталі з одним електродом, що витрачається, для живлення печі за цією схемі використовують могутні однофазні трансформатори з регульованою напругою. На печах, що працюють за такою схемою, виплавляють передільні злитки квадратного і круглого перетину (масою до 4 т) і ковальські злитки круглого перетину (масою до 40 т і більше). Для існуючих однофазних печей характерна значна зміна електричного режиму протягом плавки, викликана зміною електричного опору пічного контура і окремих його елементів, електромагнітних властивостей електродів, що витрачаються. Наслідком цього є порівняно низькі техніко-економічні показники.

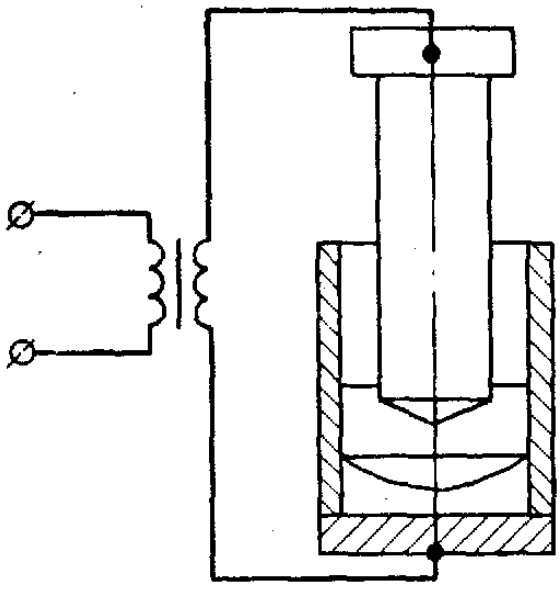


Рисунок 3.1 – Схема однофазної установки ЕШП

На рис. 3.2 і 3.3 приведено дві схеми трифазних печей електрошлакового переплаву. З рис. 3.2 видно, як електроди, що витрачаються, розташовуються в одному кристалізаторі по вершинах рівностороннього трикутника (у плані), вписаного в коло, концентричне внутрішньому діаметру кристалізатора. На таких печах не можна отримувати злитки квадратного або прямокутного перетину із-за нерівномірності температурного поля в шлаковій ванні, що викликає погіршення умов кристалізації. Крім того, при ЕШП в одному кристалізаторі трьох електродів замість одного різко зменшується відношення площ поперечних перетинів електродів і злитків (так званий коефіцієнт заповнення кристалізатора), що викликає збільшення довжини електродів, що витрачаються, і висоти печі. При цьому істотно зростає індуктивний опір струмовідводу, тобто знижується ефект застосування трифазної схеми.

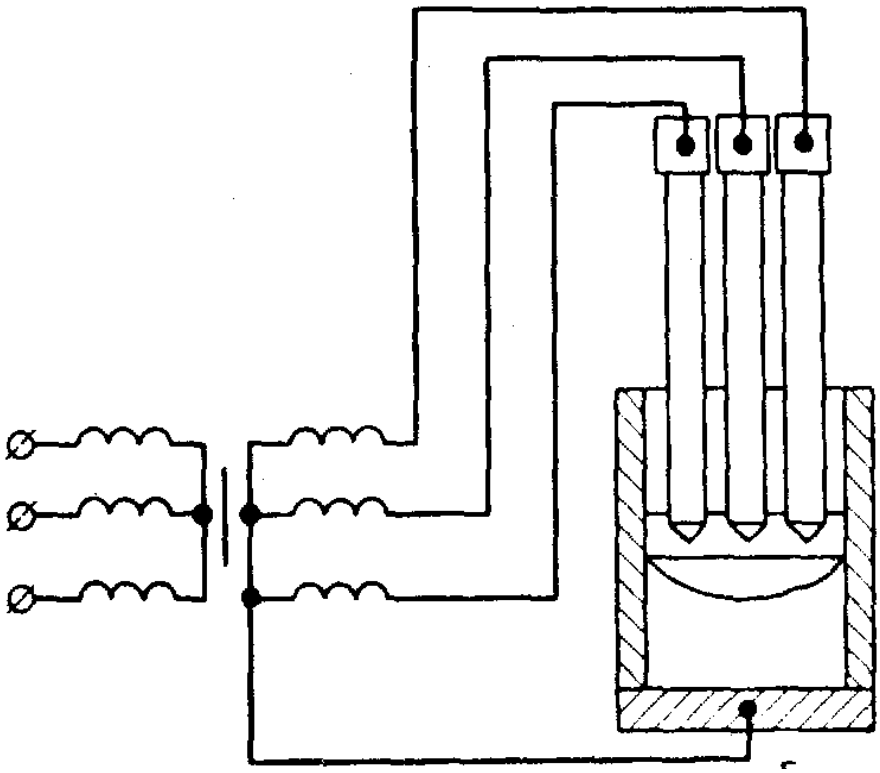


Рисунок 3.2 – Схема трифазної установки ЕШП з переплавом трьох електродів в одному круглому кристалізаторі

По трифазній схемі ЕШП можливо також одночасне розплавлення трьох електродів в трьох різних кристалізаторах (рис. 3.3.). По суті ця схема є трьома

однофазними пічками з одним електродом, що витрачається, підключеними до одного трифазного трансформатора.

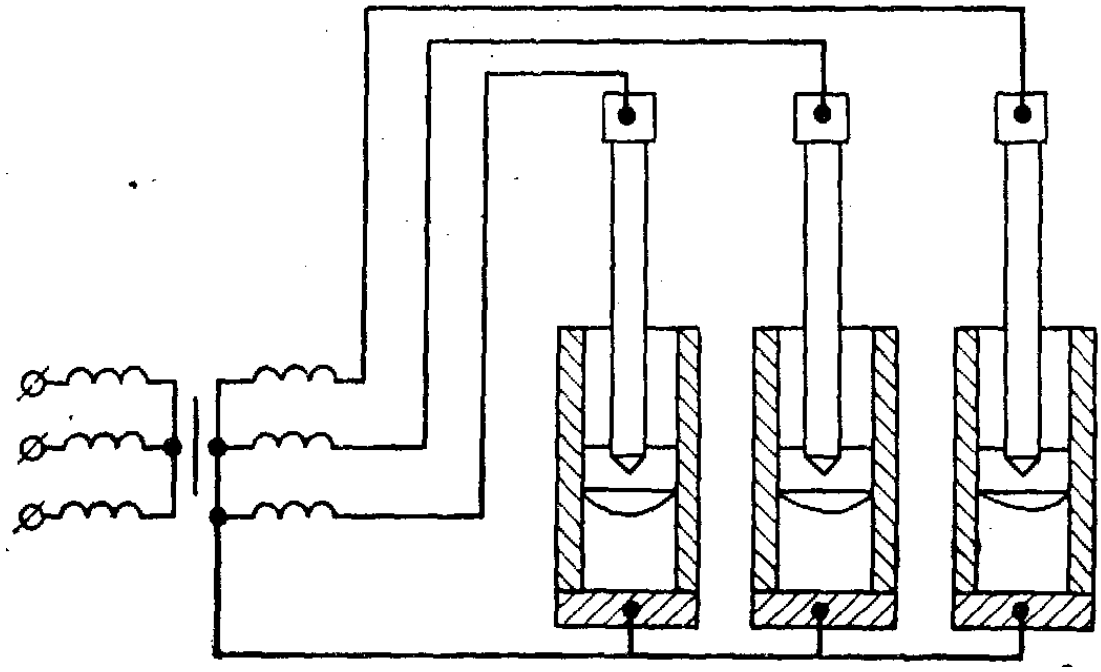


Рисунок 3.3 – Схема трифазної установки ЕШП з переплавом трьох електродів в окремих кристалізаторах

Для зменшення площі, займаною установкою за схемою рис. 3.3, кристалізатори розташовують в ряд. Істотним недоліком такої установки ЕШП є нерівномірне навантаження окремих фаз, що приводить до нерівномірного наплавлення злитків і зниження продуктивності всієї установки.

Недоліки, властиві схемам на рис. 3.2 і 3.3, привели до того, що трифазні печі ЕШП не отримали розповсюдження, хоча вони економічніші, ніж однофазні.

Техніко-економічні показники процесу ЕШП можна значно поліпшити при використанні однофазної двохелектродної біфілярної схеми (рис. 3.4), при якій в одному кристалізаторі переплавляють одночасно два електроди рівних перетинів, що витрачаються. Електроди сполучені послідовно і подаються в шлакову ванну з однаковою швидкістю одним електродотримачем з двома ізольованими один від одного струмопідводами. Така схема ЕШП дозволяє

забезпечити близьке і паралельне (біфілярне) розташування струмопідвода на всіх його ділянках, включаючи електроди, що витрачаються, що значно знижує індуктивний опір короткій мережі печі. Особливістю схеми рис. 3.4 є відсутність підведення струму до піддону і електричного зв'язку з ним злитка, що наплавляється.

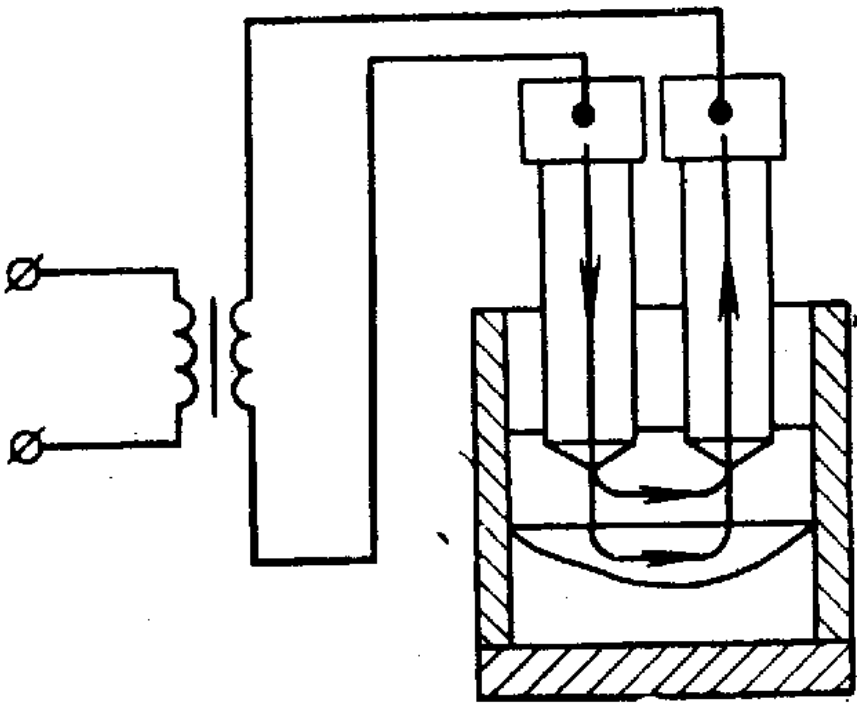


Рисунок 3.4 – Схема біфілярної установки ЕШП.

Біфілярна схема забезпечує вищу продуктивність процесу, чим звичайна однофазна схема. Це обумовлено поліпшенням електротехнічних параметрів, ефективнішим використанням тепла, що виділяється в шлаковій ванні. Застосування біфілярної схеми найдоцільніше в печах для виплавки крупних злитків квадратного і особливо прямокутного перетини. Використовуючи електроди з різною формою поперечних перетинів і змінюючи їх розташування щодо один одного, можна в широких межах міняти форму і відношення сторін злитків, що виплавляються (рис. 3.5).

Слід зазначити, що для процесу ЕШП може бути використаний також і постійний струм. По такому шляху проходило впровадження цього методу за кордоном, зокрема в США і Англії, що використали для цієї мети печі ВДП

після їх реконструкції стосовно нової технології.

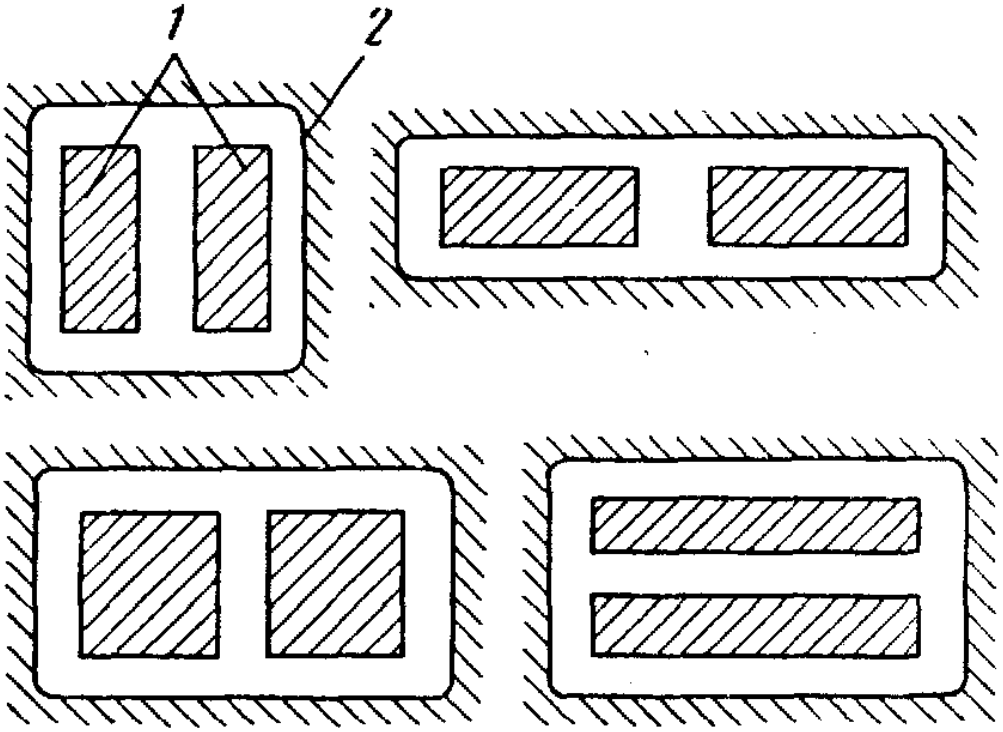


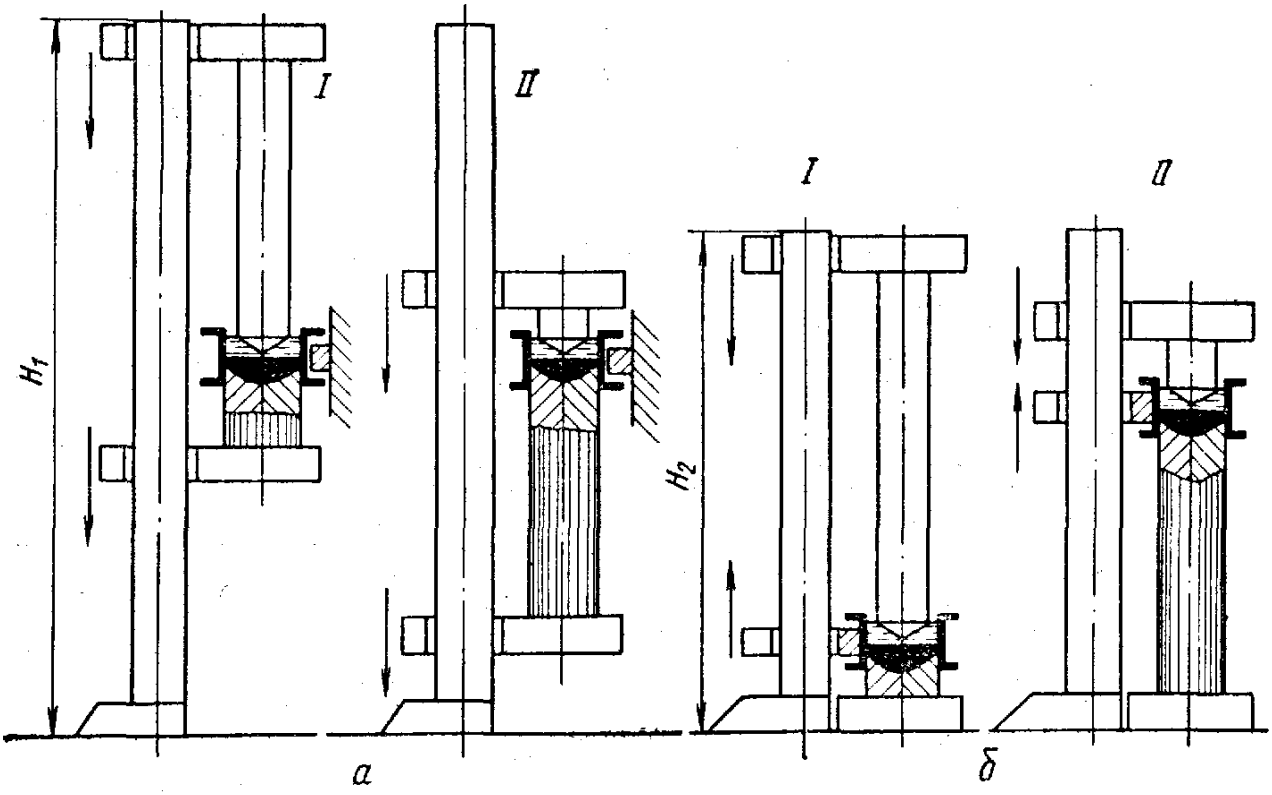
Рисунок 3.5 – Варіанти розташування електродів (1), що витрачаються, в кристалізаторах (2) різних перетинів (вигляд в плані)

Застосування постійного струму може забезпечити поліпшення використання потужності установки і зниження електричних втрат, причому робота печей ЕШП може здійснюватися як на прямій полярності, коли негативний полюс джерела живлення приєднується до електроду, що витрачається, так і на зворотній полярності, коли електрод, що витрачається, несе позитивний заряд. Проте для отримання постійного струму потрібні складні і дорогі випрямні агрегати. Крім того, при проходженні постійного струму через шлакову ванну на межі метал – шлак відбувається електроліз шлаку, що викликає зміну хімічного складу металу і шлаку. При ЕШП на постійному струмі поверхня злитка, що наплавляється, гірша, ніж при ЕШП на змінному струмі.

Незалежно від роду струму, вживаного для живлення печей, злиток ЕШП може бути отриманий по двох варіантах:

1) наплавленням в стаціонарний кристалізатор (рис. 3.1–3.4);

2) витягуванням з короткого нерухомого кристалізатора або переміщенням кристалізатора від низу до верху у міру наплавлення злитка (рис. 3.6).



а – витягування злитка з кристалізатора; б – переміщення кристалізатора по злитку; I – початок процесу; II – закінчення процесу

Рисунок 3.6 – Схеми ЕШП з відносним переміщенням злитка і кристалізатора

Неважко бачити, що при ЕШП по першому варіанту висота злитка визначається висотою кристалізатора і масою електроду, що витрачається. Печі ЕШП, що працюють із заповненням кристалізатора, є в даний час основним типом промислових печей і припускають періодичність дії агрегату.

Другий варіант дозволяє отримувати злитки більшої довжини, чим висота кристалізатора, і вести процес безперервно або напівбезперервно аналогічно безперервному або напівбезперервному розливанню сталі. Безперервність

процесу забезпечується нарощуванням електроду, що витрачається, за ходом плавки.

При витягуванні злитка з нерухомого кристалізатора (рис. 3.6, а) і підйомі такого кристалізатора по злитку (рис. 3.6, б) спостерігаються одні і ті ж явища, обумовлені відносним переміщенням кристалізатора і злитка. Проте практично використання схеми з кристалізатором, що піднімається по злитку, ефективніше, оскільки не вимагається заглиблення печі нижче за рівень підлоги і спрощується устаткування унаслідок відсутності складного механізму опускання злитка, що безперервно збільшує масу.

Оскільки рівень металевої і шлакової ванн щодо стінки рухомого кристалізатора залишається постійним протягом всієї плавки, з'явилася можливість ефективно використовувати новий спосіб інтенсифікації рафінування металу при ЕШП і поліпшення якості злитків – продування його газами і газо-порошковими сумішами, яка при звичайній схемі ЕШП складноздіснювальна або малоефективна. Введення цих реагентів здійснюється за допомогою спеціальних пристосувань, вмонтованих в стінку кристалізатора.

Перевага ЕШП з коротким рухомим кристалізатором полягає також в тому, що залежно від марки сталі, що переплавляється, є можливість додаткового охолоджування або, навпаки, обігріву тієї частини злитка, яка знаходиться поза кристалізатором. Така операція дозволяє поліпшити структуру і якість отримуваних злитків і підвищити продуктивність процесу ЕШП.

3.2 Особливості процесів рафінування сталі при ЕШП

Порівняно простий за своєю технологічною і конструктивною схемами електрошлаковий переплав є в той же час дуже складним за протікаючими фізико-хімічними процесами.

Відмітні особливості ЕШП обумовлені специфікою самого способу. До їх числа відносяться: відсутність футеровки, застосування фторидних шлаків з

низьким змістом оксидів кремнію, залоза, марганцю і інших щодо неміцних оксидів, розвинена поверхня контакту металу, що переплавляється, з шлаком, високі температури процесу.

Окислювально-відновлювальні процеси при ЕШП. Джерелом кисню при ЕШП можуть бути навколишня атмосфера повітря і вживаний шлак. Основними причинами окислення металу є наступні:

1. Прямий перехід кисню через шлак, в якому є оксиди змінної валентності (оксиди заліза, марганцю, титану та ін.);

2. Окислення металевої ванни киснем, що міститься в парах води. При цьому в метал поступає не тільки кисень, але і водень. Джерелом води при ЕШП можуть бути атмосфера, сирі шлакові матеріали, запальна суміш, раковини в литих електродах, поверхня електродів, конденсат на стінках кристалізатора і витоку в кристалізаторі і піддоні. Здатність шлаку розчиняти водяні пари і передавати в метал кисень, а разом з ним і водень тим більше, чим вище за нього основність.

3. Перехід кисню в шлак в результаті окислення поверхні електроду, що витрачається. Цей процес не тільки вносить додаткову кількість кисню до шлаку, Ної сприяє перенесенню кисню в метал, оскільки при цьому в шлаку збільшується кількість оксидів змінної валентності.

Ефективним способом зашиті шлаку від окислення, як і захисту розжареної ділянки електроду поблизу поверхні шлаку, є подача в кристалізатор осушеного аргону. Герметизація кристалізатора за допомогою кришок також знижує окислювальну дію атмосфери.

У реальних умовах розвиток окислювально-відновлювальних реакцій залежить також від концентрацій легуючих елементів в металі і оксидів в шлаку.

Ефективним способом боротьби з окислювальними процесами є добавка в шлак за ходом плавки елементів-розкислювачів аналогічно процесу дифузійного розкислювання стали в сталеплавильних агрегатах.

Поведінка вуглецю при ЕШП. При ЕШП сталей, що розкислюють, і

сплавів окислення вуглецю не протікає. Окислення вуглецю можливе тільки у разі переплавки сталей, що не розкислюють, і сплавів. В деяких випадках виникає необхідність деякого підвищення змісту вуглецю в металі. Для цього переплавку здійснюють під шлаками карбідів або при дозованій подачі на шлак в ході переплавки графіту або карбіду кальцію. При цьому метал поглинає вуглець, що міститься в шлаку.

Видалення сірки при ЕШП. Ступінь видалення сірі, що досягається при ЕШП, складає зазвичай від 50 до 75% і визначається вмістом сірки в початковому металі. Звичайний вміст сірки в металі ЕШП коливається в межах 0,003...0,007%. Позитивний вплив на ступінь видалення сірки при ЕШП надає велика площа контакту металу, що переплавляється, з шлаком, а також велика основність шлаку.

Видалення фосфору при ЕШП. Враховуючи те, що процес ЕШП здійснюється на високоосновних шлаках з мінімальною кількістю оксидів кремнію і заліза (низько окислені шлаки), а також при високих температурах, можна укласти, що при ЕШП сталі практично не спостерігається її дефосфорація.

Поведінка водню. Як вже наголошувалося, вміст водню в металі залежить від розчинності його в даному розплаві при даній температурі і парціального тиску водню над металом або шлаком. Указувалося також, що основні шлаки здатні розчинність значна кількість водню і погано захищають метал від надходження водню з газової фази.

Встановлено, що в нижній частині злитків зміст водню вищий, ніж в решті частини. Це пов'язують з внесенням водню твердим флюсом. У міру розплавлення флюсу вміст водню знижується і стає нижчим, ніж в початковому металі, причому ступінь видалення водню при ЕШП тим вище, чим більше його початковий вміст.

Видаленню водню при ЕШП значною мірою сприяє направлений характер кристалізації злитка, що створює хороші умови для виділення, відособлення і спливання бульбашок водню. Крім того, порівняно невеликі

швидкості наплавлення злитка (відповідно його кристалізації) повинні сприяти розвитку дифузії водню в рідкий метал із затверділих, але ще перебуваючих при високих температурах об'ємів металу поблизу фронту кристалізації.

При технології ЕШП, що передбачає розплавлення флюсу в кристалізаторі електродом, що витрачається, особливе значення має прожарювання флюсу безпосередньо перед плавкою. Флокеночутливі сталі, належні ЕШП, доцільно заздалегідь вакуумувати в ковші або виливниці.

Найбільш сприятливі умови для видалення водню з металу створюються при використанні нової технології ЕШП, що передбачає заливку в кристалізатор рідкого шлаку.

Поведінка азоту при ЕШП залежить від багатьох чинників, зокрема від початкового змісту його в металі, стану, в якому він присутній в сталі, а також від складу вживаного флюсу, режиму плавки і так далі.

Якщо нітриди дисоціюють при температурах ЕШП, то їх видалення відбувається в результаті перерозподілу азоту між металом і шлаком. Цьому сприяє підвищена розчинність азоту в шлаку на фторидній основі, яка на порядок вище за розчинність його в металі. Конвективні потоки в шлаку і металі сприяють прискоренню цього процесу.

При кристалізації злитка ЕШП розчинність азоту в металі у зв'язку з пониженням температури зменшується. Це створює умови для утворення вторинних нітридів, які надалі можуть частково спливати. Проте велика їх частина залишається в металі.

На початку цього розділу було відмічено, що режим ЕШП помітно впливає на окислення металу і шлаку. При плавленні кінця електроду поблизу поверхні шлакової ванни може відбуватися не тільки посилене окислення металу, але і поглинання ним азоту з атмосфери повітря.

Якщо вести ЕШП при незмінних значеннях сили струму і напруги, то до кінця плавки у зв'язку з підвищенням напруги на шлаковій ванні заглиблення електроду в шлак зменшується і можливе збільшення змісту азоту у верхній частині злитка. При диференційованому (ступінчастому) режимі ЕШП, що

забезпечує оптимальний характер плавлення електроду протягом всієї плавки, цього не спостерігається.

Приведені дані свідчать про те, що вміст азоту в металі ЕШП може регулюватися вибором складу шлаку і режиму плавки.

Видалення неметалічних включень при ЕШП. Зі всіх фізико-хімічних процесів, що відбуваються при ЕШП, процес рафінування металу від неметалічних включень найбільш складний. Складність полягає як в багатостадійності самого процесу, так і великим числом побічних явищ, що впливають на видалення включень.

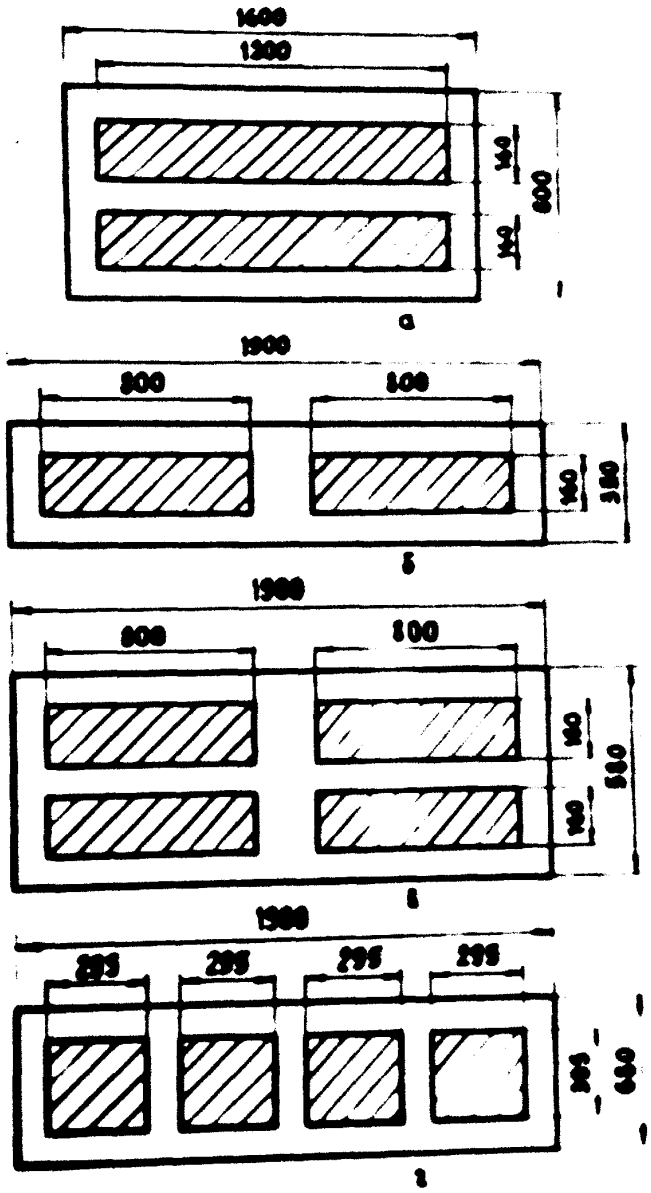
У загальному випадку можна вважати, що неметалічні включення віддаляються при ЕШП шляхом спливання і в результаті фізико-хімічної взаємодії шлаку і включень. При цьому частка впливу кожного з чинників міняється залежно від хімічного складу шлаку, електричного режиму плавки, виду включень і тому подібне.

3.3 Особливості ЕШП великолистових злитків

Відомо, що до листових злитків зазвичай відносять злитки масою більше 10 – 14 тонн. Технічні характеристики найбільш широко вживаного сортаменту листових злитків вітчизняного виробництва приведені раніше в розділі 2. Злитки листової сталі переплавляються переважно на однофазних біфілярних електрошлакових печах в стаціонарних кристалізаторах. Основні існуючі схеми струмопідводу можна розділити на 2-х і 4-х -електродні. Схеми розташування електродів, що витрачаються, в кристалізаторі представлені на рис 3.7. Приведені схеми ЕШП листової сталі відрізняються технологічністю, можливістю застосування практично до всіх конструкційних марок стали і високою продуктивністю процесу. Схема розташування електродів, що витрачаються, багато в чому визначає розташування теплових полів в шлаковій і металевій ванні.

Залежно від маси злитка перевагу має та схема, яка при задовільній

продуктивності забезпечує оптимальні температурні умови протікання процесу. Так, у міру збільшення маси злитків, що виплавляються, переважно стають схеми в та г (рис. 3.7), які характеризуються двома тепловими центрами, наявність яких дозволяє створювати однорідніше температурне поле в шлаковій ванні.



а, б – двохелектродна схема; в, г – чотириелектродна схема

Рисунок 3.7 – Схема розташування електродів, що витрачаються, в кристалізаторі при ЕШП великолистових злитків

Відомо, що шлак є невід'ємній складовій електрошлакового переплаву.

При ЕШП великолистових злитків, разом із загальними вимогами, що пред'являються до шлаків електрошлакової технології, існують ряд характерних. Оскільки різко зростає тривалість процесу (до 9–14 годин), до шлаків пред'являються жорсткіші вимоги по стабільності хімічного складу, достатній рафінуючій ємкості, фізичним властивостям.

Вимоги гомогенності шлакової ванни при робочих температурах процесу робить необхідними використання шлаку з температурою плавлення нижче температури ліквідусу металу. Температура плавлення шлаків, вживаних при ЕШП конструкційних марок сталі, складає 1200–1450^{0}С.

Основою більшості шлакових композицій, вживаних в технології ЕШП є фтористий кальцій CaF_2. В'язкість чистого розплавленого CaF_2 при 1600^{0}С складає 0,02–0,03 Па·с. Для забезпечення необхідних технологічних і металургійних властивостей в шлак на основі фториду кальцію вводять високоміцні оксиди та інші добавки (Al_2O_3, CaO, MgO, MgF_2 та ін.).

До найбільш важливих технологічних властивостей шлаків відносяться:

– в'язкість;

– щільність;

– поверхневі властивості;

– електропровідність.

Вони визначають інтенсивність проходження фізико-хімічних процесів і техніко-економічні показники; в області робочих температур в'язкість побічно характеризує рафінуючу здатність, а при температурах кристалізації металу характеризує його формуючу здатність.

Електропровідність. Електропровідність шлаку в розплавленому стані залежить як від його складу, так і від температури. Заміна фтористого кальцію Al_2O_3 значно знижує провідність флюсу; заміна 10% плавикового шпату глиноземом знижує електропровідність флюсу більшою мірою, чим заміна 40% плавикового шпату вапном. Електропровідність флюсу надає безпосередня дія на температуру процесу ЕШП. Так, зменшення електропровідності фтористого кальцію, що досягається введенням Al_2O_3 при незмінному електричному

режимі, супроводжується підвищенням температури. Підвищення температури процесу сприяє збільшенню продуктивності установки і зниженню питомої витрати електроенергії.

В'язкість. На хід і результати процесу ЕШП великий вплив робить в'язкість шлаку. Чим менше в'язкість, тим краще теплопередача і масоперенос домішок в шлаковій ванні унаслідок інтенсивнішого перемішування. Крім того, характер зміни в'язкості залежно від температури, а також співвідношення температур твердіння шлаку і металу визначають структуру і якість поверхні злитка, що наплавляється. Хороше формування злитка забезпечують довгі шлаки, гірше – короткі.

Як відомо, шлаки на основі фтористого кальцію мають відносно низьку температуру плавлення. Ці ж шлаки найбільш рідкорухливий при температурах процесу ЕШП і, отже, володіють низькою в'язкістю. Разом з тим фтористий кальцій має найвужчий температурний інтервал плавлення і кристалізації, тобто утворює короткий шлак. Присадки CaO, MgO і Al_2O_3 декілька збільшують цю зону. В цьому відношенні шлак АНФ-6 має деяка перевага перед шлаками, частіше за інших використовуваними на практиці, оскільки є довшим.

Щільність. Відмінність в щільності між рідким шлаком і металом, що піддається переплавці, має велике значення в процесі ЕШП. Розмір краплі розплавленого металу і її відрив від торця електроду визначаються в основному співвідношенням сил взаємодії між рідким шлаком і металом (міжфазного натягнення), гравітаційної (сили тяжіння) унаслідок різниці щільності шлаку і металу і динамічної взаємодії, що виникає при стіканні рідкого металу по поверхні електроду.

Поверхневі властивості. Процеси рафінування металу при ЕШП багато в чому визначаються поверхневими властивостями вживаних флюсів (шлаків). Поверхневі властивості визначають можливість розділення або прилипання металу і шлаку, поглинання шлаком неметалічних включень з металу, інтенсивність надходження в метал кисню і водню з навколишньої атмосфери.

Дослідженнями встановлено, що шлаки на основі CaF_2 володіють порівняно низьким поверхневим натягненням, невеликою адгезією до сталі і добре змочують оксидні включення типу Al_2O_3 і SiO_2. Цим пояснюється успішне застосування вказаних шлаків в практику ЕШП.

Шлак є також основним способом регулювання хімічного складу металу. Крім того, шлак бере участь у формуванні гарнісажного шаруючи, стабільність товщини якого по висоті великолистового злитка є важливою технологічною характеристикою.

Серед різноманіття шлакових композицій найбільше розповсюдження при ЕШП великолистових злитків з конструкційних марок сталі отримав шлак на основі системи CaF_2 – Al_2O_3 (флюс АНФ-6), склад якого характеризується близьким до евтектичного і температурою плавлення 1320–1340^{0}С [15]. Цей шлак забезпечує стабільність процесу, високий ступінь рафінування металу по сірці і неметалічним включенням, володіє хорошими технологічними властивостями, невисокою гігроскопічністю, дає хороший тонкий гарнісаж і гладку поверхню злитка при плавці в стаціонарний кристалізатор. Витрата шлаку при ЕШП великолистових злитків коливається в межах 40-50 кг/т сталі, зокрема 6–10 кг/т на утворення гарнісажу.

При ЕШП великолистових злитків застосовують переважно багатоелектродні біфілярні схеми струмопідводу. Особливістю таких схем струмовідводу в порівнянні з монофілярними є сприятливіший розподіл температурних полів в шлаковій ванні. Для біфілярних схем підключення електродів, що витрачаються, максимальні температури шлакової ванни (1655–1680^{0}С) спостерігаються в зазорі між електродами. Зона максимальних температур шлакового розплаву при використанні 4-х електродної біфілярної схеми так само, як і при 2-х електродною, розташована в центрі шлакової ванни, проте температурний градієнт по горизонталі шлаку незначний (біля 40^{0}С). Перехід на 4-х електродну перехресну схему змінює температурне поле шлакової ванни. У ній спостерігається два максимуми температур, відповідних кожній парі електродів. Зони максимальних температур зміщені від осей

електродів до вузьких граней кристалізатора. При цьому величина температурного градієнта по горизонталі ванни декілька зменшується (біля 25^0C).

Важливою характеристикою електричного режиму ЕШП є щільність струму в електродах, що витрачаються, оскільки вона визначає оптимальну масову швидкість переплавки, і як наслідок, технологічність і економічність процесу. На рис. 3.8 приведена залежність щільності струму в електродах, що витрачаються, в основний період плавки залежно від коефіцієнта заповнення кристалізатора стосовно ЕШП великолистових злитків з низьколегованих конструкційних марок сталі.

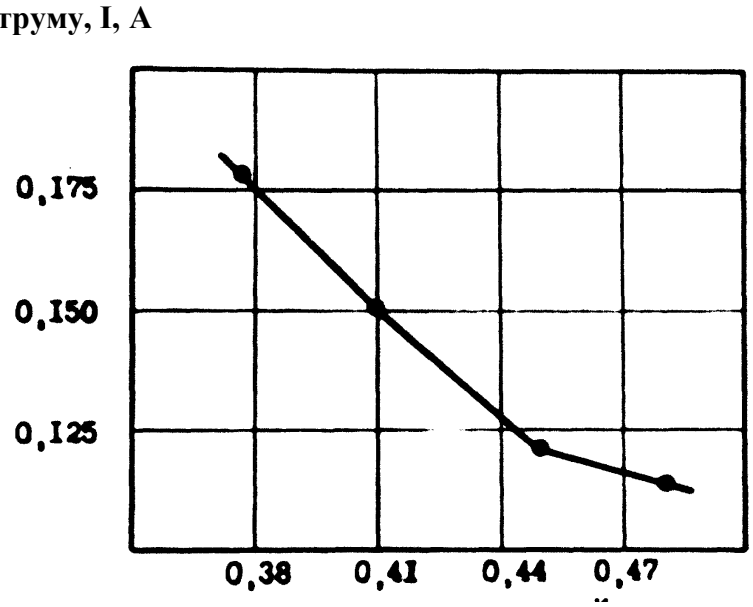


Рисунок 3.8 – Залежність щільності струму (I) в електродах, що витрачаються, від коефіцієнта заповнення кристалізатора ($К_{зап.кр.}$) при ЕШП великолистових злитків з конструкційної сталі.

При проходженні електричного струму через шлакову ванну в ній виділяється тепло, під дією якого відбувається поступове розплавлення електроду. Для отримання металу високої якості необхідно забезпечити бездуговий режим розтікання струму по шлаку, який характеризується

відповідним положенням кінця електроду у ванні. Найбільш оптимальним вважається такий режим плавлення, при якому торець електроду, занурений в шлакову ванну має конічну форму. Режим плавлення залежить від швидкості подачі електроду в шлакову ванну. Така залежність пояснюється зміною питомій потужності (на 1 кг металу, що поступає у ванну). При порівняно невеликих швидкостях подачі електроду кількість тепла, що виділяється в шлаку, достатня для розплавлення що подається в шлак метала, а при надмірно великих швидкостях подачі електроду – недостатньо, тому і електрод, що витрачається, занурюється в шлакову ванну.

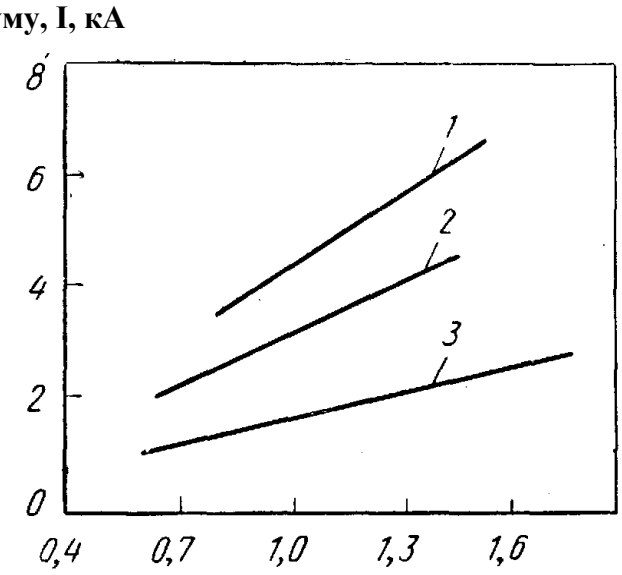
Із швидкістю подачі електроду лінійною залежністю зв'язана сила струму (рис 3.9), що дозволяє регулювати процес ЕШП по її зміні. Задаючи те або інше значення сили струму при незмінній напрузі на шлаковій ванні, тим самим задають швидкість подачі електроду або, що те ж саме, його положення в шлаку. При веденні плавки по силі струму слід вести процес так, щоб на зануреному в шлак кінці електроду була невелика циліндрова частина. Це помітно знижує окислення металу унаслідок занурення в шлакову ванну найбільш розігрітої частини електроду, що витрачається.

Із збільшенням перетину електроду стійкий процес протікає в діапазоні все великих значень сили струму. Проте, сила струму, відповідна стабільному процесу, наростає повільніше, ніж збільшується перетин електроду. Тому із збільшенням перетину електроду область стійкості процесу зміщується у бік меншої щільності струму в електроді.

З підвищенням напруги область стійкості процесу переміщається у бік збільшення щільності струму в електроді, що дозволяє збільшити силу струму і швидкість подачі електроду, тобто підвищити продуктивність процесу.

Кінцевою метою процесу ЕШП є рафінування металу і отримання однорідної структури злитка. Для цього необхідно мати незмінну форму і об'єм металевої ванни, тобто слід вести процес так, щоб витримати цю вимогу. Тому при розробці технології переплавки сталі кожної конкретної марки (групи марок) в злиток певного перетину і висоти складають програму вимірювання

електричних параметрів (сили струму і напруги) протягом плавки, що забезпечує отримання оптимального об'єму і форми металевої ванни в кожен момент плавки.



1 – 180 мм; 2 – 100 мм; 3 – 80 мм

Рисунок 3.9 – Залежність сили струму від швидкості подачі електродів різного діаметру.

Так, якщо метою ЕШП є отримання злитків невеликої маси (до 1,5 т), то весь процес може протікати на постійному електричному режимі і лише в кінці плавки необхідно понизити силу струму і напругу для виводу усадкової раковини.

Якщо ж метою ЕШП є отримання злитків більшої маси (більше 2т), то слід працювати на диференційованому електричному режимі, що передбачає зміну робочої сили струму і напруги по ходу плавки. Це пов'язано з тим, що у міру наплавлення злитка унаслідок зменшення довжини електроду, що витрачається, зменшується активний і індуктивний опір короткій мережі печі. Якщо плавку ведуть при незмінних значеннях сили струму і напруги на трансформаторі, потужність на шлаковій ванні збільшується (наростає напруга на ванні), росте глибина металевої ванни і зменшується швидкість твердіння

злитка по висоті. Вказані недоліки особливо небезпечні на крупних злитках. Даний процес залежить також від фізичних властивостей металу, що переплавляється: теплопровідності і теплоємності, питомого електричного опору, магнітних властивостей і від деяких інших.

Плавне зменшення потужності, що вводиться, шляхом зміни за певною програмою сили струму і напруги дозволяє забезпечити задані швидкості наплавлення злитка при оптимальній формі і глибині металевої ванни і таким чином отримувати високоякісний метал.

Після наплавлення злитка заданої висоти і маси приступають до виведення усадкової раковини. Про закінчення процесу судять по досягненню дзеркалом шлакової ванни нижнього рівня зливних патрубків кристалізатора або сплаву придатної частини електроду.

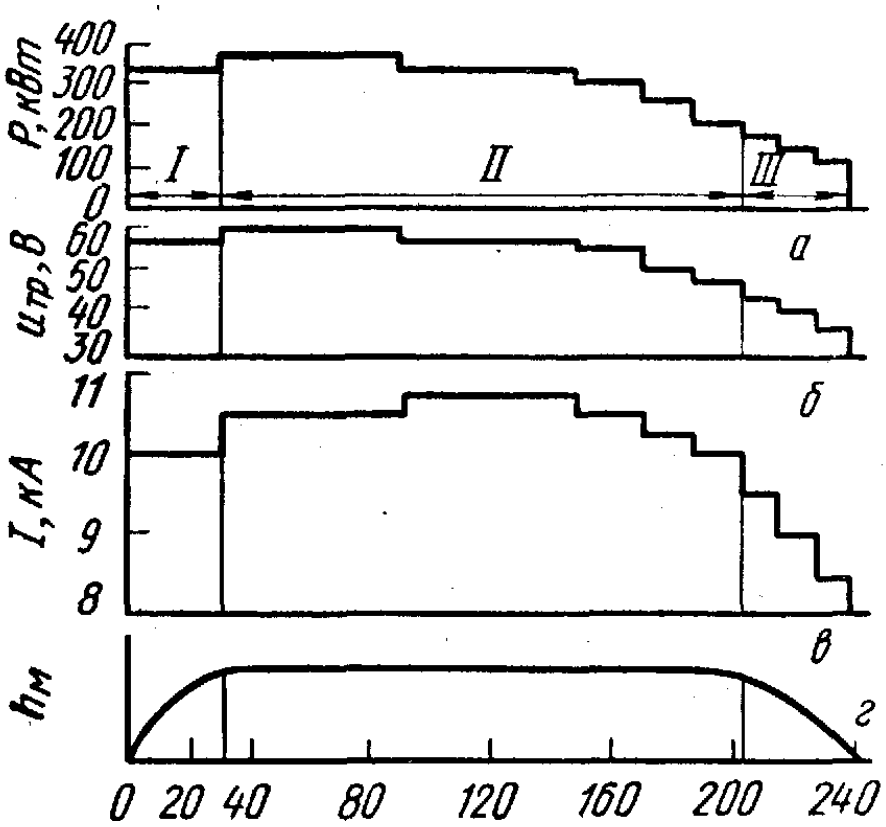
Закінчення плавки проводять таким чином: припиняють подачу електроду, при цьому живлення установки не відключають. Електрод витримують до повного оплавлення зануреної в шлак частини, що супроводжується поступовим зниженням сили струму до нуля і появою дугових розрядів між торцем електроду і поверхнею шлакової ванни. Потім електродотримач піднімають до виведення огарка електроду з кристалізатора, напругу відключають.

При виведенні усадкової раковини невеликих злитків (1–2 т) за 15–20 хв. до закінчення плавки знижують силу струму і напругу.

Закінчення процесу при ЕШП крупних злитків здійснюється за спеціальною програмою. Можливий варіант, коли частину електроду, що витрачається, що залишилася, використовують як метал для підживлення головної частини аналогічно процесу електрошлакового підживлення звичайних злитків. Для цієї мети можна використовувати і електроди, що не витрачаються (графітові або водоохолоджувані). Раціональне програмування електричного режиму ЕШП на стадії закінчення плавки дозволяє отримати практично горизонтальну поверхню верхньої частини злитка.

На рис. 3.10 представлена типова програма зміни електричного режиму

установки ЕШП. При складанні цієї програми враховувалися всі параметри, що впливають на хід процесу і якість металу.



а – зміна потужності, що виділяється в шлаковій ванні; *б* – зміна ступеню напруги трансформатора; *в* – зміна сили струму; *г* – глибина металевої ванни;

I – період наведення шлакової ванни; II – період сталого плавлення; III – період виведення усадкової раковини

Рисунок 3.10 – Енергетичний режим процесу ЕШП ($d_{ел}$=250мм, $d_{кр}$=550мм, маса злитка 2,5т).

3.4 Особливості виробництва електрошлакової листової сталі

Перші великогабаритні товсті листи сталі марок 09Г2С і 16ГНМА товщиною 80-115 мм з металу ЕШП було виготовлено на початку 60-х р.р. У той час ще не були створені спеціалізовані печі ЕШП для виплавки плоских

листових злитків і злитків-слябів ЕШП. Тому перші промислові листи ЕШП були отримані по досить складній технологічній схемі: ковальський злиток ЕШП круглого перетину (діаметр 1200 мм, маса 10–14 т) кування на пресі на браму - плющення на товстий лист.

Електрошлакові злитки виплавляли по двох технологічних варіантах (рис. 3.11):

1) ЕШП трьох електродів, що витрачаються, діаметром 300 мм за трьохфазною схемою в кристалізатор діаметром 1200 мм;

2) ЕШП одного електроду, що витрачається, діаметром 800 мм за однофазною схемою в кристалізатор діаметром 1200 мм.

Для ЕШП використовували ковані і литі електроди, що витрачалися, відлиті в спеціальну виливницю. В результаті ЕШП отримані ковальські злитки масою 12 т, які на пресі кували на браму масою 9,2 т, а потім прокатували на листи завтовшки 80–115 мм, масою 6 т, тобто витратний коефіцієнт від злитка ЕШП до листа ЕШП складає приблизно 2,0. Електрошлаковий листовий метал, отриманий за вказаною технологією, значно перевершував за всіма показниками листовий прокат відкритої виплавки.

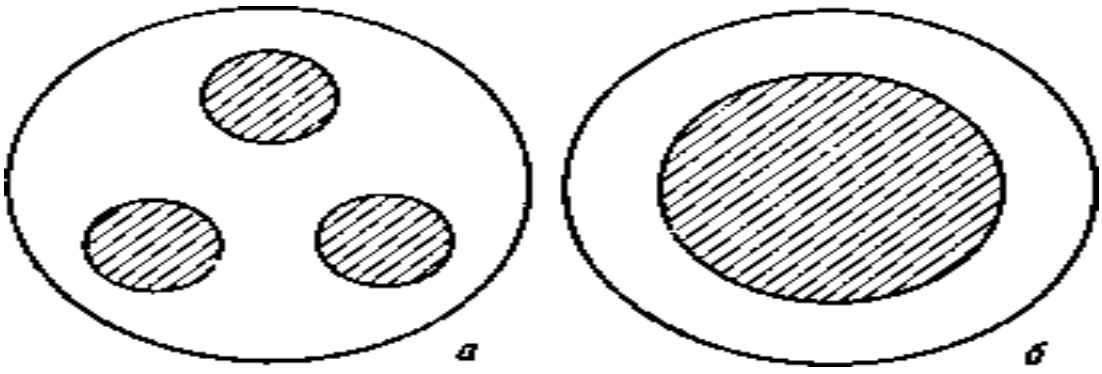


Рисунок 3.11 – Варіанти розташування електродів, що витрачаються, при виплавці ковальських злитків діаметром 1200 мм за трьох - (а) і однофазною (б) схемами

Слід зазначити, що для отримання з ковальського злитка ЕШП важчого листа (масою 10–15 т) діаметр злитка повинен бути більше 1500-1800 мм. При

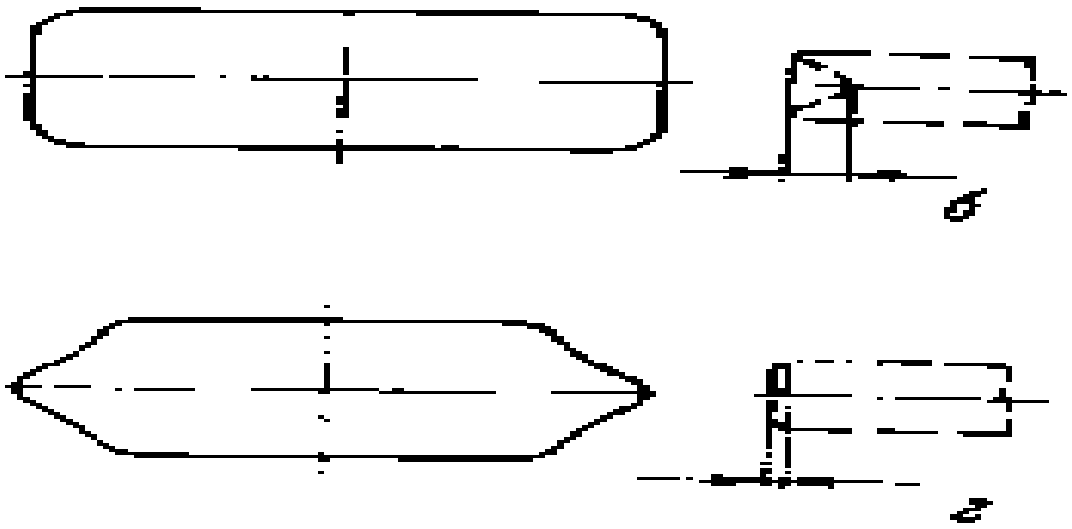
таких параметрах неминучий розвиток хімічної неоднорідності в порівнянні із злитками ЕШП щодо малого перетину. Тому для виплавки особливо крупних ковальських злитків ЕШП потрібне застосування складнішої технології, що ще більш здорожує листовий метал, отриманий по цій технологічній схемі.

Таким чином, технологічна схема отримання товстого сталевого листа (ковальський злиток ЕШП – брама – лист) відрізняється підвищеною трудомісткістю і витратою металу, вимагає для своєї реалізації унікального ковальсько-пресового устаткування і за своїми техніко-економічними показниками не завжди задовольняє споживача.

Поза сумнівом, досконалішою технологією виробництва широкоформатного товстолистового металу є отримання листового прокату з плоских листових злитків ЕШП прямокутного перетину. Створенню сучасної промислової технології отримання сталевого листа ЕШП передувала тривала, скрупульозна робота. Для реалізації цієї технології потрібно було створити принципово нові технологічні схеми електрошлакової виплавки плоских злитків і злитків-слябів ЕШП, розробити найбільш раціональний зі всіх крапок зір конструктивні схеми спеціалізованих електрошлакових печей і технологічного устаткування. Проте, перш за все належало визначити оптимальну геометрію листового злитка ЕШП.

Загальновідомо, що великотоннажні листові злитки, що отримуються з металу звичайної виплавки, подібно до великотоннажних ковальських злитків мають не гладку, а хвилясту поверхню (рис. 3.12, а). Зроблено це для зміцнення скориночки, запобігання її руйнуванню і заливці рідкого металу під дією ферростатичного тиску.

Злиток прямокутного перетину з рівними вузькими гранями (див. рис. 3.12, б) застосовують для плющення на слябінгу або іншому обтисковому стані, що має вертикальні бічні валяння. Якщо ж плющення доводиться вести на стані, що не має бічних валів, передбачається інша форма перетину злитка: бічні грані повинні бути опуклими (див. рис. 3.12, в, г) щоб уникнути бічних заходів, металу і з метою зведення до мінімуму бічної обрізі.



а – злиток металу звичайної виплавки; б – злиток ЕШП для плющення на слябінгу, в і г – злитки ЕШП для плющення на обтисковому стані без бічних вертикальних валів (штриховою лінією показані вид кромки листа і величина бічної обрізі при плющенні без бічних валів)

Рисунок 3.12 – Типові перетини великотоннажних листових злитків

Залежно від конкретних умов переділу листових злитків печі ЕШП забезпечують кристалізаторами того або іншого профілю. Для отримання листових злитків ЕШП масою до 20 т по схемі заповнення доцільно застосовувати універсальні (модульні) панельні кристалізатори, у яких вузькі панелі можна розсовувати по ширині. Такі кристалізатори дозволяють плавно міняти масу злитків ЕШП, що виплавляються, шляхом зміни їх ширини.

У 1967 р. на ПАТ “Дніпроспецсталь” вперше в світовій практиці були введені в промислову експлуатацію дві біфілярні двохелектродні електрошлакові печі типу У-436, призначені для виробництва великотоннажних (масою 9–13 т) листових злитків ЕШП.

Біфілярна схема живлення печі ЕШП передбачає кратне двом число електродів, що витрачаються. Залежно від конкретних умов можна переплавляти як електроди-сляби, так і електроди квадратного перетину. І ті та інші можуть бути катаними і литими, отриманими методом безперервного розливання або відливання в спеціальні виливниці. Так, на печах типу У-436

ПАТ “Дніпроспецсталь” переважно використовуються електроди-сляби. Їх мають в своєму розпорядженні широкі грані один до одного.

На печі У-436 два електроди, що витрачаються, включено у вторинний ланцюг трансформатора послідовно і подаються в кристалізатор синхронно одним механізмом. Електроди в електродотримачі ізольовані один від одного, тому струм йде по ланцюгу електрод - шлакова ванна - електрод.

Біфілярне розташування двох електродів, що витрачаються, і струмоведучих шин дозволяє до мінімуму звести індуктивні втрати в короткій мережі електрошлакової установки, внаслідок чого підвищується ефективність використання пічних трансформаторів, знижується витрата електроенергії на тонну переплавленого металу. Піч харчується від електропічного трансформатора.

Виплавка злитків починається на рідкому старті. Розплавлений в тиглі-ковші шлак заливається в кристалізатор сифоновим способом. Переплавка здійснюється в автоматичному режимі за допомогою програматора прямої технологічної дії. Програма, що закладається в останній, забезпечує в кожен момент часу певну швидкість подачі електродів. Ця швидкість розраховується стосовно конкретної геометрії шлакової ванни з урахуванням теплофізичного стану системи. Окрім виконання програми за швидкістю наплавлення програмний пристрій забезпечує в процесі переплавки заданий опір шлакової ванни, або, іншими словами, відстань між електродами, що витрачаються, і поверхнею металевої ванни.

Готові злитки ЕШП мають хорошу поверхню. Її не потрібно піддавати ремонту або зачищати перед подальшим плющенням.

Однофазні біфілярні електрошлакові печі типу У-436 дозволяють виплавляти листові злитки тільки за схемою заповнення, тобто із застосуванням стаціонарного кристалізатора, що має висоту, достатню для отримання необхідного злитка, встановленого на нерухомому під час плавки піддоні, в якому переплавляються два рухомі електроди, що витрачаються. У зв'язку з цим на печах типу У-436 візок підйому кристалізатора, призначений тільки для

роздягання злитка після плавки, не має власного приводу, а переміщається за допомогою накидних ланцюгів візком електродотримача.

Схема ЕШП листових злитків із заповненням нерухомого кристалізатора завдяки своїй простоті і надійності, безумовно, сприяла швидкому промисловому освоєнню процесу ЕШП і знайшла широке розповсюдження: в даний час основним типом промислових печей ЕШП, що діють в країні, є печі, що працюють із заповненням кристалізатора. Разом з тим ця схема має ряд істотних недоліків, які обмежують застосування її в новостворюваних листових печах ЕШП.

Стаціонарні кристалізатори вимагають для свого виготовлення великої кількості дефіцитної міді, складні і дорогі у виготовленні. Із збільшенням маси злитків відповідно збільшуються розміри кристалізаторів і ускладнюється їх виробництво. Крім того, в процесі експлуатації виявилися і інші недоліки великогабаритних стаціонарних кристалізаторів: зварний мідний кокіль кристалізатора з часом деформується і його доводиться рихтувати. Посилювання кристалізатора за рахунок збільшення товщини стінки кокілю, застосування ребер жорсткості, відмова від зварки і перехід до модульних конструкцій (кристалізатор складається з декількох модульних елементів - панелей) не вирішують повністю поставленого завдання. Проте головний недолік технологічної схеми отримання листових злитків шляхом заповнення нерухомого відносно злитка полягає в тому, що по виплавці злитків високою більш 1,5-2 м відбувається захолоджування їх донної частини.

Вказаних недоліків позбавлена технологічна схема отримання листових злитків в рухомому щодо злитка короткому кристалізаторі, що переміщається в процесі плавки від низу до верху назустріч електродам, що витрачаються.

Застосування технологічної схеми ЕШП листових злитків з відносним переміщенням злитка і кристалізатора дозволяє інтенсифікувати рафінування металу і істотно розширити технологічні можливості ЕШП. Зокрема, завдяки постійності рівнів рідкого шлаку і металу щодо кристалізатора легко здійснюється продування їх газовими і газопорошковими сумішами, яка при

схемі заповнення складноздіснювальна і малоефективна. В результаті вдається підвищити ступінь рафінування рідкого металу і його дегазацію, у тому числі і видалення водню. Завдяки створенню електромагнітного поля усередині рухомого кристалізатора можливе управління процесами плавлення, переміщення і кристалізації рідкого металу. При цьому в метал, що кристалізується, нескладно здійснити введення пружних коливань для подрібнення макроструктури злитка.

Крім того, при ЕШП з рухомим щодо злитка коротким кристалізатором без особливих труднощів може бути забезпечений додатковий обігрів донної частини злитка або сповільнене його охолоджування або, навпаки, посилене вторинне охолоджування злитка у міру його наплавлення. Останнє доцільно при ЕШП ряду аустенітних та інших сталей.

Короткі рухомі кристалізатори прості у виготовленні, надійні в роботі, допускають проводити злив шлаку в кінці плавки. Дуже важливою є також та обставина, що на основі ЕШП в короткому рухомому кристалізаторі успішно вирішується завдання отримання плоских листових злитків з великим відношенням ширини до товщини, зокрема злитків-слябів ЕШП.

У числі основних переваг злитка-сляба ЕШП перед листовим злитком можна відзначити наступне. У зв'язку з різким зменшенням об'єму і глибини металевої ванни практично виключаються ліквацийні процеси в металевій ванні і відповідно відчутно зростають якісні показники стали. В процесі виплавки злитків-слябів виключається ряд технологічних операцій по їх переділу і термічній обробці, яким піддається електрошлаковий листовий злиток (сповільнене охолоджування, відпал, нагріваючи при передачі гарячим всадом, плющення злитків на слябінгу). Злитки-сляби, минувши плющення на слябінгу, за даються безпосередньо в листопрокатний стан. В результаті сумарна обрізь листів знижується в 2,5–3 рази, а вихід придатного збільшується в середньому на 10%.

Широкі грані злитка-сляба мають хвилясту поверхню. Така поверхня досягається за рахунок рифлений, спеціально виконаних на широких гранях

формуючої частини кристалізатора.

Проведені дослідження показують, що литий метал ЕШП відрізняється високою щільністю, пониженим вмістом і рівномірним розподілом сірки і неметалічних включень, структурною і хімічною однорідністю, а також високою ізотропною механічних властивостей. Це зумовило широке застосування електрошлакової технології для виготовлення фасонних відливань різного призначення, зокрема корпусів замочної арматури і судин високого тиску, колінчастих валів суднових двигунів, прокатних валів.

Безперечною перевагою багатострумкової схеми ЕШП є те, що виплавка злитків-слябів ЕШП може бути здійснена на тих же печах, що і виплавка плоских листових злитків ЕШП.

3.5 Висновки

1. Показано, що технологічний режим ведення процесу електрошлакового переплаву надає істотний вплив на якість переплавленого металу. Особливу увагу також необхідно приділяти електричному режиму плавки, який повинен забезпечувати визначену і постійну впродовж всього процесу глибину занурення електродів в шлакову ванну і не допускати появи дуги над шлаковою ванною і контакту електроду з металевою ванною.

4 АНАЛІЗ ЯКОСТІ КОНСТРУКЦІЙНОЇ ЛИСТОВОЇ СТАЛІ ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ

4.1 Особливості виплавки початкової сталі для ЕШП

Досвід отримання сталі методом ЕШП показав взаємозв'язок технології виплавки і розливання початкового металу з технологією ЕШП, оскільки тільки в цьому випадку забезпечується максимальне поліпшення якості металу [13–17].

Основну частину початкової сталі для ЕШП в даний час виплавляють в дугових електропечах за традиційною технологією: методом переплаву ввідходів із застосуванням кисню і на свіжій шихті. Як правило, проведення окислювального і відновного періодів здійснюється однаково незалежно від подальшого призначення металу. Проте при отриманні металу, призначеного для ЕШП, вирішуються деякі спрощення технології: виплавка сталі деяких марок без електромагнітного перемішування рідкої ванни, збільшення кількості відходів (зокрема стружки) при шихтовці завалення, скорочення витримки металу під білим шлаком в період рафінування до 30 хв., ранішому введенні розкислювальних сумішей з порошком алюмінію.

Виплавка легованих конструкційних сталей відповідального призначення при виплавціі сортової сталі у відкритій дуговій сталеплавильній печі проводиться тільки на свіжій шихті. При виплавці цих сталей для подальшого ЕШП використовується метод переплаву відходів, що дозволяє інтенсифікувати плавку, використовувати немобільні відходи, понизити собівартість металу. Вказані спрощення технології виплавки в дуговій сталеплавильній печі практично не впливають на якість металу ЕШП. Разом з тим деякі технологічні параметри початкової плавки посилюються. Зокрема, при виплавці підшипникової сталі виключається застосування відходів шамоту для наведення рафінувального шлаку, оскільки окисел титану, що міститься в шамоті, відновлюється з переходом титану в метал і утворенням стійких

нітридів титану, що не видаляються при ЕШП. При високій чистоті і щільності металу ЕШП включення нітридів титану істотно погіршують шлифуємість сталі.

Принципове значення для подальшого ЕШП мають розкисленість початкової сталі і особливий вміст в металі алюмінію. При ЕШП має місце взаємодія металу з шлаком і атмосферою повітря, в результаті якого відбувається часткове окислення елементів, що мають високу хімічну спорідненість до кисню. У зв'язку з цим важливо мати в початковому металі деякий надмірний вміст таких елементів, особливо алюмінію. Конкретні значення необхідного вмісту елементу залежать від складу флюсу, вживаного при ЕШП, і деяких інших чинників (складу атмосфери, швидкості наплавлення, заглиблення електроду), розкислювання по ходу плавки та ін. Наприклад, при виплавці сталі 12Х2Н4А для ЕШП під флюсом АНФ-6 вміст алюмінію в початковому металі повинен складати 0,03–0,04%, при виплавці сталі 00Х16Н5МЗБ 0,08–0,18%, при виплавці сталі ШХ15СГ 0,05–0,06%. Підвищений вміст алюмінію в початковій сталі для ЕШП забезпечується збільшеною нормою введення кускового алюмінію при кінцевому розкислюванні сталі (наприклад, для сталі 12Х2Н4А він становить 1,5 кг/т проти звичайного 0,8 кг/т).

Як правило, при виплавці початкової сталі збільшують також вміст кремнію (у середньолегованих сталях без алюмінію, титану і цирконію) на 0,03-0,08%, титану – на 0,05–0,15%, ванадію - на 0,02%, марганцю - на 0,03–0,05% при його вмісті до 1% і на 0,1–0,2% у високомарганцевих сталях. Зміни вмісту решти елементів при ЕШП практично не відбувається. Проте, для усунення впливу можливої неточності аналізу для ЕШП не призначають плавки з граничним вмістом вуглецю, хрому, нікелю, вольфраму, азоту (у сталях, легованих азотом), кобальту, фосфору та інших елементів.

У сталях, легованих алюмінієм і титаном, вміст кремнію обмежують “зверху”, зменшуючи допустиме значення на 0,05–0,07%, оскільки при ЕШП частина кремнію може бути відновлена з кремнезему флюсу алюмінієм і

титаном металу. Вміст сірки значно зменшується при ЕШП, а рівень її допустимої концентрації за технічними умовами зазвичай достатньо високий (0,01–0,015%). Проте, у ряді випадків обмежують вміст сірки в початковій сталі, щоб після ЕШП її вміст складав 0,002–0,004% і забезпечував виконання інших вимог технічних умов (розміри сульфідних включень, пластичні властивості упоперек волокна та ін.). Чим нижче вміст сірки в початковій сталі і, отже, в переплавленій, тим менше виявлятиметься ліквацийна неоднорідність в крупних злитках ЕШП деяких високовуглецевих сталей.

У початковій підшипниковій сталі вміст сірки обмежують до 0,006%, в сталі 18Х2Н4В(М) А – до 0,012%. Використання при ЕШП основних флюсів дозволяє збільшити допустимий вміст сірки в початковому металі.

Останніми роками проведений ряд робіт по вдосконаленню процесу ЕШП в частині стабілізації хімічного складу початкової сталі шляхом створення нейтральної атмосфери в кристалізаторі, розкислювання шлаку по ходу плавки. Більш того, розроблені способи, що передбачають виправлення складу початкового металу при ЕШП. При електрошлаковому переплаві з отриманням листових злитків за біфілярною схемою струмопідводу сплавляють два сляби - електроди, отримані від одного злитка, головною і донною частиною вниз. В цьому випадку нівелюється ліквація вуглецю, фосфору, сірки, кремнію (позитивна в головній і негативна в донній частині), що була в гуркоті початкового злитка. Сплавляючи два або декілька електродів однієї марки, можна також отримати метал в звужених межах хімічного складу.

На одному із заводів для виправлення браку початкового металу, пов'язаного з перевищенням допустимого відношення вмісту ніобію до вуглецю в низьковуглецевій неіржавіючій сталі, провели переплав електродів разом з приварениими до них прутками сталі ШХ15. Відношення перетину прутка до перетину електроду зумовило підвищення вмісту вуглецю в переплавленій сталі і повну відповідність складу металу вимогам технічних умов. Відомі та інші приклади остаточного легування або розбавлення складу металу, зокрема добавкою роздроблених сплавів або оксидів разом з розкислювачами. Вказані

вище способи, безумовно, ускладнюють процес ЕШП і застосовуються в основному при необхідності.

Для забезпечення підвищених вимог до якості металу ЕШП все ширше застосовують обробку початкового металу вапняно-глиноземистим шлаком. Ефективність обробки початкового металу синтетичним шлаком полягає як загалом в значному зменшенні неметалічних включень і кисню в сталі, так і в утворенні таких типів неметалічних включень в сталі (в основному алюмінатів кальцію), які добре віддаляються при ЕШП. Слід також відзначити і те, що технологія обробки початкового металу синтетичними шлаками стандартизує якість металу від плавки до плавки.

Дослідження останніх років виявили також доцільність обробки початкового металу вакуумом і продування його аргоном в ковші. Крім загального поліпшення якості металу, при цій обробці досягається зниження в сталі вмісту водню, що дуже важливе, оскільки при ЕШП без вживання спеціальних заходів вміст водню в металі не знижується, а іноді навіть зростає. Таким чином, необхідно забезпечити низький вміст водню в початковому металі. Дегазація металу у вакуумі або при продуванні аргоном в ковші (при атмосферному тиску або у вакуумі) сприяє також поліпшенню розливаємості металу при безперервному литві заготовок або розливанні у виливниці.

Для сталей деяких марок доцільне введення в початковий метал для ЕШП різних рідкоземельних металів та їх сплавів. Враховуючи легкоплавкість цих з'єднань й накопичений досвід розкислювання шлаку по ходу ЕШП, можна вважати ефективнішим використання сплавів РЗЕ безпосередньо при ЕШП.

У невеликих масштабах сталь для ЕШП виплавляють в мартенівських печах і кисневих конверторах. В основному це малолеговані сталі, до яких пред'являються вимоги відсутності розшарувань, крупних скупчень неметалічних включень. При виплавці цих сталей в мартенівських печах і кисневих конверторах використовують матеріали найбільш високої якості (чавун та ін.) для забезпечення пониженого вмісту сірки та інших домішок.

У перспективі слід чекати широкого використання для ЕШП сталі,

отриманою методом прямого відновлення із залізорудних окатишів. Відсутність небажаних домішок і постійний рівень якості початкового металу дозволяє отримувати метал ЕШП також підвищеної якості. Для вирішення окремих завдань може використовуватися метал відкритою і особливо вакуумної індукційної плавки.

4.2 Вплив параметрів плавки ЕШП на якість злитка, що наплавляється

Загальні закони кристалізації металу діють і в умовах ЕШП, проте нагадаємо особливості, властиві твердінню металу при ЕШП:

1. Направлене розташування кристалів, обумовлене послідовним твердінням металу від низу до верху, при посиленому тепловідводі через піддон і кристалізатор та безперервному підведенні до верхньої частини злитка тепла від більш гарячого електродного металу, що поступає, і шлакової ванни. Глибина рідкої ванни регулюється параметрами переплаву.

2. Відсутність контакту рідкого металу з атмосферою.

3. Наявність пластичного шлакового гарнісажу між злитком і кристалізатором.

4. Надходження в рідку ванну рафінованого металу без екзогенних включень і з мінімальним вмістом кисню.

Ці особливості забезпечують щільну і однорідну структуру злитка без дефектів усадкового характеру та із значним придушенням ліквацийних процесів, хорошу поверхню злитка без дефектів типу заворотів, відсутність скупчень неметалічних включень і тому подібне.

Направлені тепловідвід і підвищений градієнт температур сприяють утворенню стовбчастої структури злитка, при цьому завдяки осьовій або радіально-осьовій спрямованості кристалів забезпечується міцність злитка. Контакт рідкого металу з шлаковою ванною, особливо в кінці плавки, забезпечує кристалізацію злитка майже без усадкової раковини.

У злитку ЕШП можна виділити три зони:

1. *Зона нижньої частини злитка з конусом кристалів.* Перші порції розплавленого металу змішуються з частково розплавленим металом приманки і дають початок для вертикального або навіть віялоподібного зростання кристалів. Завдяки інтенсивному відведенню тепла через мідний водо охолоджувальний піддон поверхня розділу між твердою і рідкою фазами (фронт кристалізації) розташовується майже горизонтально. Режим розведення процесу і розміри приманки істотно впливають на структуру нижньої частини злитка.

При використанні приманок малого діаметру і холодному режимі розведення процесу може утворитися товстий шлаковий гарнісаж між піддоном і злитком, що наплавляється. Тепловідвід вниз різко зменшиться і замість осьової спрямованості кристалів буде радіальна.

Щоб уникнути цього, особливо при роботі на рідкому старті (заливка рідкого шлаку в кристалізатор), необхідно мати достатній перегрів шлаку і відразу починати наплавлення металу. В умовах стандартного ведення процесу для злитка діаметром 425 мм охолоджуючий вплив приманки і піддону позначається на глибині металевої ванни тільки до висоти злитка, що наплавляється, близько 600 мм.

2. *Зона верхньої частини злитка.* Ця зона включає зону відключення струму і усадки. При відключенні струму припиняється підведення тепла в шлакову і різко зменшується теплоповідвід в металеву ванну, що відразу відбивається на умовах кристалізації – змінюється нахил стовбчастих кристалів, з'являється пошарова кристалізація. Проте завдяки великому запасу тепла в шлаковій ванні в перший період після відключення кристалізація металу забезпечує необхідну його якість. Надалі внаслідок розвитку усадкових явищ (за відсутності надходження свіжого металу для живлення усадкових пір) щільність структури зменшується і у верхній частині злитка по осі утворюється ямка, тобто полога відкрита усадкова раковина.

Утворення невеликих закритих усадкових раковин при ЕШП можливо

лише при неправильно вибраному режимі закінчення плавки: при глибокій металевій ванні у момент відключення струму (у злитках великих перетинів). У цих випадках кристалізація ванни металу через деякий час починається і зверху (а не тільки знизу і збоку), де утворюється тонка скориночка твердого металу. Внаслідок усадки усередині металу, що кристалізується, виникає вакуум. Під дією сил верхня скориночка металу прогинається, розривається і всередину раковини засмоктується рідкий шлак.

Не дивлячись на ряд удосконалень технології (зниження потужності, що вводиться, в кінці плавки, застосування режимів виведення усадки з підживленням електродом, що витрачається і не витрачається) із збільшенням перетину злитка дефектна головна частина зростає.

3. *Основна зона злитка* характеризується направленою кристалізацією і розвитком стовбчастої радіально-осьової структури. Якщо злитки малих перетинів (до діаметру 300…400 мм) характеризувалися суцільною зоною стовбчастих кристалів, то із збільшенням перетину злитка унаслідок зниження охолоджуючої дії стінок кристалізатора і піддону в осьовій частині злитка ЕШП утворюється зона рівноосних кристалів. Перехід від стовбчастої до рівноосної кристалізації тим вірогідніше, чим менше температурний градієнт, тобто чим глибше металева ванна (градієнт представляє різниця температур на поверхні ванни і у фронту кристалізації, ділену на відстань між точками виміру температур – глибину ванни). Глибина рідкої металевої ванни є одним з найважливіших параметрів ЕШП.

Для отримання осьової або радіально-осьової кристалічної структури злитка доцільно мати неглибоку і пологу рідку ванну, тобто невисоку швидкість наплавлення злитка. Проте при цьому знижується продуктивність агрегату, зростає витрата електроенергії, тобто погіршуються техніко-економічні показники переплаву. При дуже низькій швидкості наплавлення внаслідок підведення малої потужності знижується температура шлаку і погіршуються умови рафінування металу, можливе заплутування шлаку, на поверхні злитка виникають пережими (“гофри”).

Тому для кожного перетину злитка і марки сталі існують допустима максимальна глибина рідкої металевої ванни та максимальна швидкість наплавлення. Вибір режиму переплаву ведуть з урахуванням цього, даючи певний діапазон швидкостей наплавлення, верхня межа яких відповідає максимально допустимому. У загальному випадку приймається, що оптимальна глибина ванни складає половину діаметру (сторони) злитка. Чим більше перетин злитка, тим глибше рідка металева ванна.

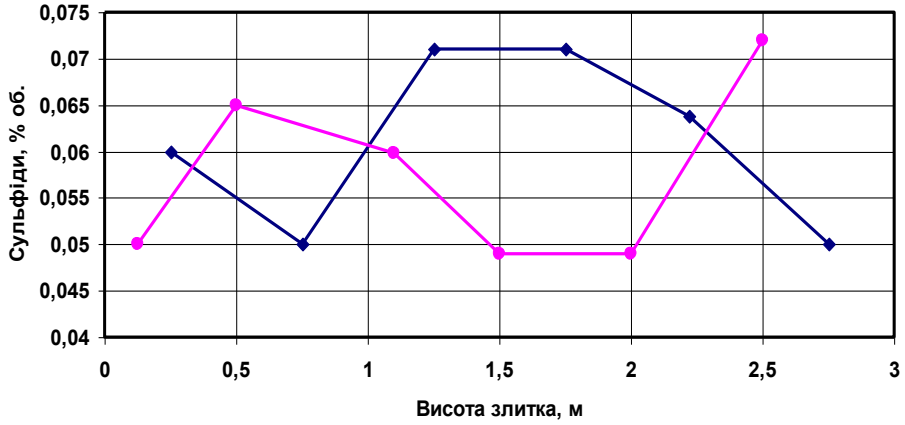
4.3 Оцінка якості сталі після електрошлакового переплаву

4.3.1 Оцінка забрудненості сталі

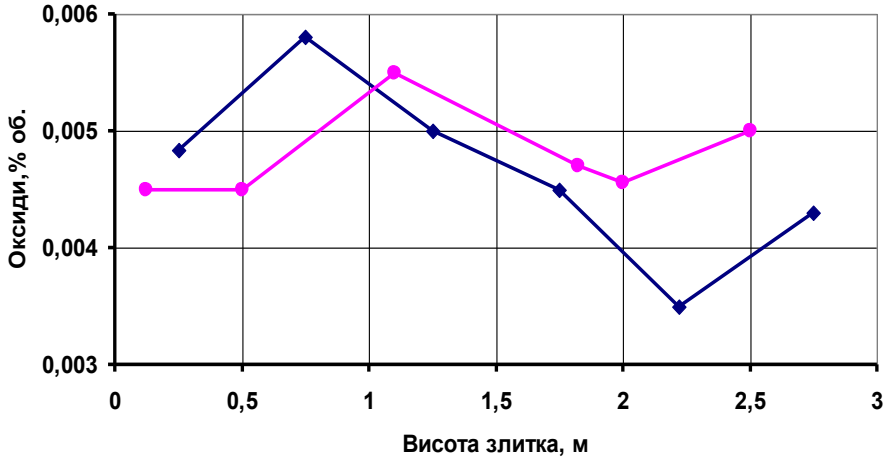
Характерними включеннями в сталі 15Х2Г2СВА є сульфіди марганцю, силікати заліза і марганцю, оксидні включення (глинозем), що мають глобулярну або близьку до неї форму. Розташування включень в металі рівномірне. Злитки характеризуються рівномірним розподілом неметалічних включень по їх висоті (рис. 4.1). Відхилення від середнього розміру включень незначне (1218% від.) (рис. 4.2).

4.3.2 Оцінка механічних властивостей сталі

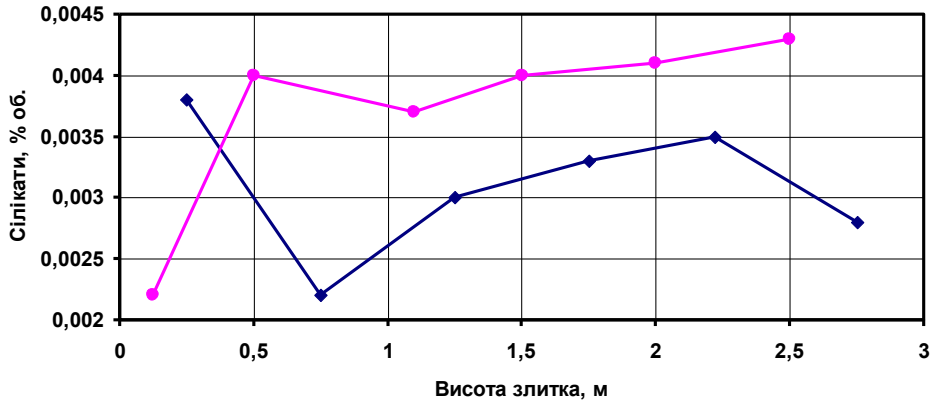
Результати оцінки якості товстолистової сталі 15Х2Г2СВА свідчать про досягнення високого рівня комплексу механічних властивостей та рівномірний розподіл його значень по висоті злитка (таблиця 4.1). Слід зазначити високий рівень ударної в'язкості металу при потрібний температурі, що істотно перевищує (у 1,3–1,5 при t=-40 ^{0}C і в 4-5 разів при t=-70 ^{0}C). Досягнутий також високий рівень ударної в'язкості після міханічного старіння, що не регламентується для даної марки сталі. За інших рівних умов цьому сприяє розкислювання шлакової ванни алюмінієм при ЕШП і, як його результат, забезпечення вертикальної хімічної однорідності злитків, зокрема за алюмінієм.



а



б

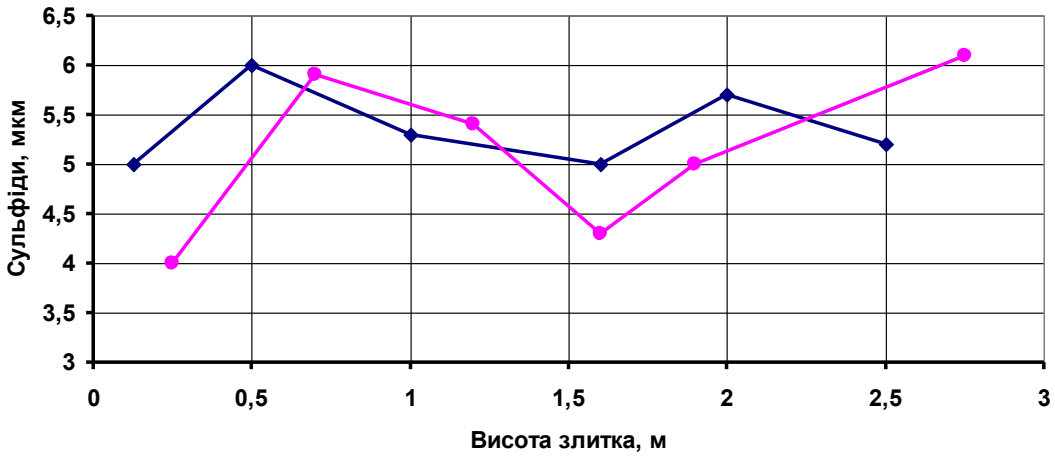


в

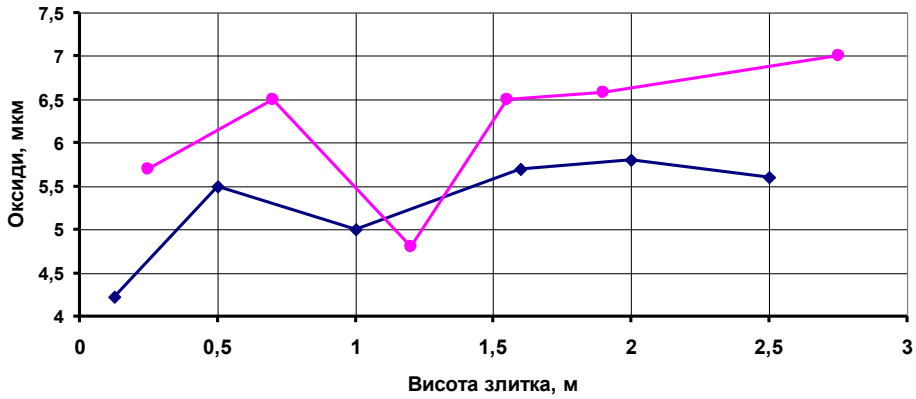
_____ – осьова частина злитка; _____ – периферійна частина злитка

а – розподіл сульфідів; б – розподіл оксидів; в – розподіл силікатів

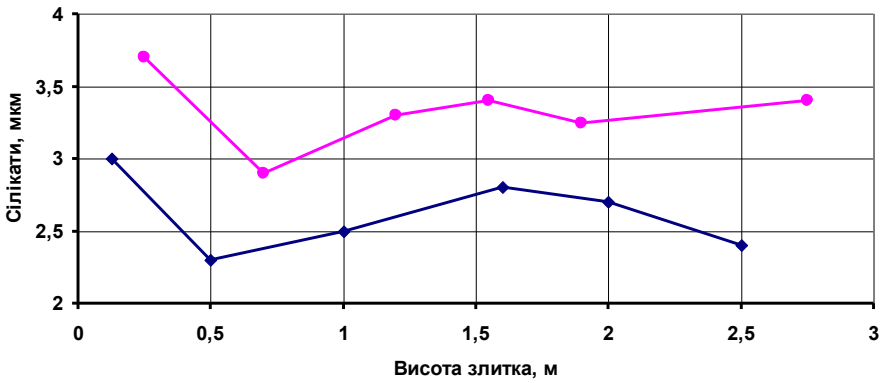
Рисунок. 4.1 – Розподіл неметалічних включень по висоті злитків із сталі 15Х2Г2СВА



а



б



в

_____ – осьова частина злитка; _____ – периферійна частина злитка

а – включення сульфідів; б – включення оксидів; в – включення силікатів

Рисунок 4.2 – Зміна середнього розміру включень по висоті злитків сталі 15Х2Г2СВА

4.4 Порівняльна оцінка якості листової сталі типу 15Х2Г2СВА після різних видів рафінуючого переплаву

Дослідження якості листової сталі типу 15Х2Г2СВА після різних видів рафінуючого переплаву (ЕШП, ВДП та ЕПП) показали, що злитки всіх переплавних процесів мають вельми однорідну, щільну макроструктуру без яких-небудь слідів усадкових або ліквацийних дефектів. Дисперсність дендритної структури злитків була практично однаковою при всіх переплавках. Відстані між осями дендритів складали 0,37–0,39 мм. Щільність металу злитків переплавних процесів дорівнювала $(7{,}848–7{,}851)\cdot10^3$ кг/м^3, тоді як в початковому злитку вона складала в середньому $7{,}836\cdot10^3$ кг/м^3.

У злитку ЕДП спостерігалася типова для злитків, відлитих в звичайну виливницю, неоднорідність макроструктури. Відстань між осями дендритів складала 0,60 мм. Характерною для цього злитка була невідповідність напряму зростання первинних кристалів і головних осей дендритів. На сірчаних відбитках виразно позначилися сліди звичайної для таких злитків зональної ліквації.

Хімічний склад сталі в злитках переплавних процесів контролювали в пробах головного, середнього і донного поперечних макротемплетів на периферії, в центрі і на середині радіусу, а в початковому злитку – по ковшовій пробі. Вміст основних легуючих елементів в сталі в результаті різних видів рафінуючого переплаву практично не змінився. Виняток становив лише елемент з високою пружністю пари – марганець, вміст якого при вакуумних переплавах знизився унаслідок випаровування на 0,32% при ВДП і на 0,67% при ЕПП. Можна відзначити також деяке зниження вмісту хрому при ЕПП (на 0,07%). Скільки-небудь помітній ліквації хімічних елементів в злитках всіх способів переплавки не виявлено.

Результати визначення вмісту домішкових елементі в металі представлені в таблиці 4.2. З таблиці видно, що ЕШП забезпечує надзвичайно ефективне рафінування сталі по сірці. Вміст її в металі в результаті ЕШП знижується в

Таблиця 4.1 – Механічні властивості товстолистового прокату із сталі 15Х2Г2СВА після ЕШП

Товщина листа, мм	Рівень листа	σ_T, МПа	σ_B, МПа	δ, %	ψ, %	KCU_{-40}, МДж/м^2	KCU_{-70}, МДж/м^2	KCT, МДж/м^2
40	верх	492	628	32	70	1,58	1,48	1,63
	низ	490	619	31	68	1,55	1,44	1,60
50	верх	446	608	31	71	1,56	1,44	1,59
	низ	449	603	30	72	1,54	1,45	1,58
60	верх	451	589	28	70	1,32	1,13	1,37
	низ	443	580	28	70	1,31	1,12	1,39
33…50	вимоги ТУ	412	569	25	60	0,98	0,29	-
51…70		392	540	25	60	0,98	0,29	-

2,5 рази. ВДП і ЕПП відносно десульфурації металу є малоефективними процесами. Фосфор не віддаляється ні при одному з переплавних процесів.

Таблиця 4.2 – Вміст домішкових елементів сталі 15Х2Г2СВА при різних способах виплавки, %

Спосіб виплавки	S	P	O	N	Zn	Sn	As	Sb	Cu
ЕДП	0,018	0,011	0,0090	0,0133	0,0027	0,0037	0,0093	0,0014	0,10
ЕШП	0,008	0,012	0,0041	0,0128	0,0025	0,0032	0,0085	0,0014	0,09
ВДП	0,015	0,011	0,0033	0,0100	0,0004	0,0025	0,0084	0,0013	0,10
ЕПП	0,013	0,011	0,0028	0,0070	0,0003	0,0015	0,0075	0,0006	0,04

Домішки кольорових металів віддаляються в значних кількостях тільки при вакуумних переплавках, причому найефективніше при ЕПП. ВДП забезпечує різке зниження вмісту в сталі тільки цинку та істотне – олова. Миш'як при всіх переплавних процесах віддаляється в незначних кількостях.

Вміст газів в металі визначався в пробах від головного, середнього і донного макротемплетів. У злитках переплавних процесів проби відбирали по осі злитка, а в початковому також з периферії і в осьовій площині злитка. Вміст кисню визначали методом вакуум-плавлення при температурі 1650 °С і тиску 0,001 Н/м^2, а азоту – хімічним методом (відгоном аміаку).

Дослідження показали, що в злитках переплавних процесів розподіл газів рівномірний. У злитку початкового металу відмічений підвищений вміст кисню в периферійних ділянках підприбуткової зони (до 0,015 %) і знижене – в тих же ділянках донної частини (до 0,006%). Усереднені дані за вмістом газів в злитках різних способів виробництва приведені в таблиці 4.2.

Методи визначення вмісту неметалічних включень способом металографії та фізико-хімічним способом показали, що всі види рафінуючого переплаву забезпечують ефективне рафінування сталі за киснем. Його вміст в металі в результаті ЕШП знизився більш ніж в два рази, а при вакуумних

переплавках – втричі.

Відносно рафінування сталі за азотом найбільш ефективним виявився ЕПП, при якому вміст цього елементу в металі знизився удвічі. При ВДП азот віддалився приблизно на 30%; а при ЕШП його видалення практично не спостерігалося.

У злитках переплавних процесів розподіл неметалічних включень був достатньо рівномірним. У злитку початкового металу забрудненість металу сульфідами зростає від периферії до осі і від донної частини до прибуткової. Оксидами найбільшою мірою були забруднені осьові об'єми підприбуткової частини злитка. Усереднені дані по забрудненості металу злитків різних способів виробництва приведені в таблиці 4.3.

З таблиці 4.4 видно, що всі види рафінуючого переплаву забезпечили різке зниження забрудненості сталі неметалічними включеннями. Загальний вміст включень [% (об.)] знизився при ЕПП майже на порядок, при ЕШП – в 5 разів і при ВДП – більш ніж удвічі. За ступенем очищення металу від оксидів переплавні процеси в порядку зменшення ефективності розташовуються в наступній послідовності: ВДП, ЕПП, ЕШП. При цьому звертає на себе увагу виключно низький вміст оксидів в металі ВДП, яке було підтверджено і повторними визначеннями. Враховуючи, що вміст кисню в металі всіх переплавних процесів має досить близькі значення, можна припустити, що фактичний вміст оксидів в металі ВДП вище зафіксованого. Ймовірно, частина оксидних включень знаходиться тут в дрібнодисперсному стані у складі сульфідної фази, якій в металі ВДП в 8 разів більше, ніж в ЕПП, і в 3,5 рази, чим в ЕШП.

Найбільш низький вміст сульфідів був зафіксований в металі ЕПП і ЕШП. Висока ефективність ЕШП відносно рафінування сталі за сульфідними включеннями досить добре відома. Що ж до ЕПП, то тут необхідно відзначити невідповідність між зафіксованою ефективністю рафінування стал і за сіркою і сульфідним включенням. Так, при зниженні вмісту сірки з 0,018% всього лише до 0,013% об'ємний відсоток сульфідів зменшився в результаті ЕПП більш ніж

в 10 разів. Ймовірно, це значною мірою пов'язано з тим, що в металі ЕПП сульфіди присутні в надзвичайно дрібнодисперсному стані і майже не фіксуються. Такі включення, розміром менше 1 мкм і що важко піддаються підрахунку, були виявлені при збільшенні в 1000 разів.

Таблиця 4.3 – Забрудненість неметалічними включеннями сталі 15Х2Г2СВА при різних способах виплавки

Спосіб виплавки	Склад включень				Склад включень % до осаду	
	% (об.)			% мас.		
	загальне	оксиди	сульфіди		шпінелі	силікати
ЕДП	0,0705	0,0087	0,0616	0,0081	59,2	40,8
ЕШП	0,0152	0,0037	0,0115	0,0021	83,4	16,6
ВДП	0,0385	0,0006	0,0380	0,0043	32,9	67,1
ЕПП	0,0076	0,0027	0,0049	0,0013	38,8	61,1

Окрім зниження загального вмісту неметалічних включень в сталі в результаті різних виді в рафінуючого переплаву змінюються їх розміри, форма, склад. Як правило, в початковому металі спостерігаються комплексні оксиди і оксисульфідні включення складного складу розміром до 50 мкм і більше, зазвичай розташовані у вигляді достатніх крупних скупчень, а також евтектичні виділення сульфідів. У металі різних виді в рафінуючого переплаву включення є відособленими виділеннями оксидів і одиничними виділеннями сульфідів, розміри яких зазвичай не перевищують 5 мкм.

Істотні зміни відбуваються в результаті переплаву у складі оксидів. В процесі ЕШП найповніше віддаляються силікатні включення і їх частка в загальній кількості оксидів різко знижується. Основним типом включень в металі ЕШП є найбільш глиноземисті включення, що важко видаляються. В результаті вакуумних переплавок найістотніше знижується зміст включень шинельної групи. Силікати при цих переплавках віддаляються менш успішно, і частка їх в загальній кількості включень зростає.

Таким чином, дослідження сталі в литому стані показало високу чистоту переплавленого металу за шкідливими домішками, газами і неметалічними включеннями і високу якість злитків переплавних процесів. Ці обставини зумовили високий рівень та ізотропію механічних властивостей металу.

Переходячи до оцінки якості прокатаного металу, перш за все слід привести характеристики зламів. У таблиці 4.5 приведені механічні властивості 40-мм листів різних способів виробництва. Проби для визначення механічних властивостей відбиралися від верхньої і нижньої частин листа з середньої третини по ширині. Оскільки механічні властивості металу порівнюваних проб опинилися на одному рівні, в таблиці 4.4 приведені тільки дані по пластичності і ударній в'язкості, які змінювалися в широких межах.

Видно, що в результаті рафінування при переплавках рівень пластичності і ударної в'язкості металу істотно підвищився. Показники пластичності в подовжньому напрямі підвищилися більш ніж на 10%, в поперечному – на 20%, а у вертикальному подовження збільшилося в 6 разів, а звуження поперечного перетину в середньому в 15 разів. Метал практично став ізотропним.

Таблиця 4.4 – Механічні властивості 40-мм листів із сталі 15Х2Г2СВА різних способів виплавки

Спосіб виплавки	Подовжні			Поперечні			Вертикальні	
	δ_5, %	ψ, %	$a_н$, МДж/м^2	δ_5, %	ψ, %	$a_н$, МДж/м^2	δ_5, %	ψ, %
ЕДП	17,7	63,5	1,14	16,4	55,9	0,74	2,8	5,2
ЕШП	19,7	70,6	2,07	19,7	71,1	2,02	18,1	68,4
ВДП	19,4	70,2	2,05	19,2	70,9	1,98	17,9	67,9
ЕПП	20,1	71,2	2,16	20,8	71,8	2,11	18,7	69,5

Дослідження опірності сталі розповсюдженню тріщини проводили на поперечних ударних зразках типу Менаже з гострим надрізом та ініційованою тріщиною. Проби відбирали з середньої третини від головної частини листів.

Від кожного листа випробовували по п'ять зразків. Випробування проводили в умовах динамічного вигину.

Робота руйнування зразків з тріщиною для початкового металу склала в середньому 0,34, для ЕШП 1,09; для ВДП 0,87 і для ЕПП 1,11 МДж/м^2. Таким чином, при ЕШП і ЕПП опірність сталі розповсюдженню тріщини підвищилася втричі, а при ВДП – більш ніж в два рази. Ймовірно, нижче значення роботи руйнування зразків з тріщиною для сталі ВДП пов'язане з підвищеним вмістом сульфідів в металі в порівнянні з іншими видами переплаву [18, 19].

Таким чином, можна зазначити високу ефективність різних видів рафінуючого переплаву в з точки зору підвищення якості, рівня механічних властивостей, якості зламів і працездатності листів.

4.5 Висновки

1. Показано, що після виплавки сталі марки 15Х2Г2СВА за допомогою ЕШП значно покращилися її характеристики: ударна в'язкості металу збільшилася в 1,3 – 1,5 разів при t=-40^{0}С та в 4-5 разів при t=-70^{0}С. Зокрема, показники пластичності в подовжньому напрямі підвищилися більш ніж на 10%, в поперечному – на 20%, а у вертикальному подовженні збільшилися в 6 разів, а звуження поперечного перетину в середньому в 15 разів.

2. Дослідженнями вмісту домішкових елементів сталі 15Х2Г2СВА при різних способах виплавки встановлено, що в злитках переплавних процесів розподіл газів рівномірний. У злитку початкового металу відмічений підвищений вміст кисню в периферійних ділянках підприбуткової зони (до 0,015 %) і знижене – в тих же ділянках донної частини (до 0,006%).

3. Дослідженнями забрудненості неметалічними включеннями сталі 15Х2Г2СВА при різних способах виплавки показали, що найбільш низький вміст сульфідів був зафіксований в металі ЕПП та ЕШП: при зниженні вмісту сірки з 0,018% (при ЕШП) до 0,013% (при ЕПП) об'ємний відсоток сульфідів в результаті ЕПП зменшився більш ніж в 12 разів.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

5.1 Фактори небезпеки в цехах ЕШП

Основними причинами виникнення нещасних випадків на металургійному виробництві є [20–22]:

• Ковзання, спотикання і падіння на площини; • Рухомі механізми, навантажувачі та крани;

• Контакт з контрольованими і неконтрольованими джерелами енергії;

• Вдихання різних агентів (гази, пари, пил і дим);

• Контакт з гарячим металом;

• Пожежі та вибухи;

• Екстремальні температури;

• Випромінювання (неіонізуюче і іонізуюче);

• Тяжкість і напруга праці;

• Шум і вібрація;

• Відсутність підготовки по ТБ;

• Неадекватне попередження нещасних випадків і інспектування.

Серед характерних небезпек у металургійному виробництві слід відмітити:

1. Опіки розплавленим металом або шлаком при вибухах металу і шлаку в результаті зіткнення їх з водою або вологими предметами, а також внаслідок обриву або перекидання ковшів з розплавленим металом і шлаком. Опіки можуть бути і при виплеску металу і шлаку.

2. Ураження електричним струмом є досить поширеним видом травматизму в металургії. Поразка струмом зазвичай відбувається від дотику до дротів, відкритих рубильників, контролерам і плавких вставок, до несправних світильників штучного освітлення, до струмоведучих частин електричних апаратів та обладнання, що опинилася під небезпечною напругою. Поразка працівників електричним струмом викликала більше 2% випадків травматизму;

опіки електричною дугою - незначне число травм (0,1%).

3. Серйозну небезпеку в металургійних цехах представляє падіння людей з висоти під час вивантаження шихтових матеріалів на естакадах, бункерах і бункерних ямах, а також падіння з підніжок вагонів, платформ, кранів і підкранових колій. Важкі травми були при падінні людей з дахів будинків і всякого роду майданчиків, сходів і решіток. В результаті падіння людей сталося понад 6% нещасних випадків.

4. Нещасні випадки при експлуатації підйомно-транспортних пристроїв виникають внаслідок наїзду транспорту і придавлювання їм людей до навколишніх предметів, перекидання кранів, придавлювання електромагнітами і грейферами, обривів вантажів, тощо. Ці види нещасних випадків викликали найбільше число травм в чорній металургії (до 25%).

У процесі виготовлення злитків методом ЕШП використовується велика кількість шихтових матеріалів та обладнання яке неможливо вилучити з виробничого циклу. Тому оптимальними способом мінімізації ризику виникнення нещасних випадків можна вважати вдосконалення систем безпеки, контроль вологості у шихтових матеріалах, посилення контролю за електричним та підйомно-транспортним обладнанням. За цими критеріями можна сформувати наступні рекомендації:

• Захист від ураження струмом: Якщо установка складається з декількох плавильних електропечей (постів), підключених до загального джерела живлення, то вторинний силовий ланцюг кожної електропечі повинен мати таке заземлення, щоб були забезпечені заходи безпеки проти струмів, що виникають між точками заземлення та елементами окремих електропечей. При цьому вторинний силовий ланцюг кожної електропечі в неробочому стані повинен мати заземлення, але вимкнений від джерела живлення.

• Захист від викидів металу і шлаку: Кабелі вторинної силового ланцюга повинні бути розміщені таким чином, щоб бризки розплавленого металу і шлаку не могли викликати їх руйнування. Контрольний пульт управління повинен бути захищений від викидів розплавленого металу і шлаку. Приямки

фундаменту електропечі, куди можуть потрапляти викиди розплавленого металу і шлаку, повинні мати дренаж для видалення води.

• Захист від випарів і газів: Електропіч повинна бути забезпечена пристроєм газовідводу від кристалізатора для з'єднання з системою очищення газів від шкідливих домішок. Це пов’язано з тим, що однією з особливостей ЕШП являється видалення шкідливих речовин із шлакової ванни (випарів і газів). Випари і гази, які можуть потрапляти в повітря робочої зони, повинні віддалятися за допомогою цехової (заводський) вентиляції і (або) місцевих відсмоктувачів.

• Захист від теплового та інфрачервоного випромінювання впливів Електричне, механічне, гідравлічне обладнання, а також рухомі з'єднання вторинної силового ланцюга повинні бути захищені від впливу теплових випромінювань і конвективних гарячих газів (або витримувати їх). Джерелом теплового та інфрачервоного випромінювання є електрошлакова установка. Теплове випромінювання - спільний процес конвекції і теплопровідності, при якій враховується температура всіх тіл, які мають температуру вище абсолютного нуля. Тобто це електромагнітне випромінювання з безперервним спектром, що випускається нагрітими тілами за рахунок їх теплової енергії., це є свічення тіл, зумовлене нагріванням.

Для захисту від теплового та інфрачервоного випромінювання використовуємо теплоізоляційні матеріали для робочих поверхонь, що є джерелами випромінювання теплоти. Саме тому, повинні бути передбачені заходи захисту конструктивних елементів електропечі від перегріву їх вище допустимих меж, що викликається електричними і електромагнітними явищами.

Таким чином, виробництво злитків методом ЕШП є надзвичайно перспективним напрямом розвитку світового машинобудування. Питання забезпечення охорони здоров‘я та навколишнього середовища у виробництві злитків повинно знаходиться під суворим контролем державних органів з питань безпеки життєдіяльності та охорони праці. Використання розроблених

спеціалістами рекомендацій щодо організації виробництва дозволить зменшити ризики та негативний вплив на людину та довкілля.

5.2 Техногенна безпека в цехах ЕШП

Техногенна безпека характеризує стан захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Діяльність із забезпечення техногенної безпеки є складником виробничої, експлуатаційної та іншої діяльності відповідних посадових осіб і працівників підприємств, установ та організацій.

Забезпечення техногенної безпеки суб’єкта господарювання покладають на його керівника. А забезпечення техногенної безпеки під час проєктування, будівництва об’єктів, будівель і споруд -– на орган архітектури, замовників, забудовників, проєктні та будівельні організації.

З метою збереження життя, здоров'я і працездатності працівників у процесі трудової діяльності, Закон України «Про охорону праці» передбачає створення на підприємстві одноіменної служби, що контролює виконання ряду заходів, спрямованих на підвищення рівня техніки безпеки на підприємстві, зокрема:

1. Затвердження положень з питань охорони праці;
2. Інструкції щодо виконання робіт і поведінки працівників на території підприємства, у виробничих приміщеннях, на будівельних майданчиках і робочих місцях;
3. Вступні інструктажі з питань охорони праці при прийнятті на роботу;
4. Навчання та перевірка знань з питань охорони праці;
5. Організація проведення періодичного медичного огляду працівників;
6. Забезпечення засобами індивідуального захисту;
7. Атестація робочих місць за умовами праці;

У разі визначення потенційно-небезпечного об’єкта, за результатами проведення ідентифікації відповідно до Закону України «Про об'єкти підвищеної небезпеки (Із змінами, внесеними згідно із Законом № 762-IV від 15.05.2003, ВВР, 2003, № 30, ст.247), як об’єкт підвищеної небезпеки, розробляється Декларація безпеки ОПН та План локалізації і ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС) для кожного об’єкта підвищеної небезпеки, який вони експлуатують або планують експлуатувати.

Для збереження техногенної безпеки фахівцям пропонуються такі заходи:

– виявлення всіх чинників ризику техногенного характеру, включаючи виявлення небезпеки продукції, що випускається, технологічних процесів, операцій, виробничих об'єктів і об'єктів життєзабезпечення населення на даній території;

– розробка прогнозу наслідків катастроф, розмірів утрат і збитку у всіх виявах цієї проблеми;

– розробка профілактичних заходів з метою стійкої й безаварійної роботи підприємств і збереження екологічної рівноваги [23–29].

5.3 Висновки

1. Виробництво злитків методом ЕШП є надзвичайно перспективним напрямом розвитку світового машинобудування. Питання забезпечення охорони здоров‘я та навколишнього середовища у виробництві злитків повинно знаходиться під суворим контролем державних органів з питань безпеки життєдіяльності та охорони праці. Використання розроблених спеціалістами рекомендацій щодо організації виробництва дозволить зменшити ризики та негативний вплив на людину та довкілля.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розглянуто сучасні способи поліпшення якості товстолистової сталі та визначено основні чинники, які впливають на якість сталі. Визначено, що серед основних дефектів листової сталі є шиферність, розшарування, древовидність, дендридність і флокени.

2. Встановлено, що різні види розшарувань в товщині листа в основному пов'язані з дефектами, що утворюються в злитку сталі в результаті ліквацій них процесів, утворення газових міхурів та інші. Найбільш ефективним способом усунення подібних дефектів сталевого злитка, а отже і зниження вірогідності утворення розшарувань в листовій сталі після плющення, є переплав злитків великолистової сталі методом електрошлакового переплаву.

3. Аналіз особливостей ЕШП великолистових злитків показав, що найбільше розповсюдження набули печі типу У-436 та ЕШП-20ВГ. Зазвичай використовуються листові злитки масою більше 10–14 тонн прямокутного перетину з широким діапазоном співвідношень ширини до товщини – від 1,8 до 6,3, і висотою від 1800 мм до 3000 мм, а іноді і більше.

4. Показано, що технологічний режим ведення процесу електрошлакового переплаву надає істотний вплив на якість переплавленого металу. Особливу увагу також необхідно приділяти електричному режиму плавки, який повинен забезпечувати визначену і постійну впродовж всього процесу глибину занурення електродів в шлакову ванну і не допускати появи дуги над шлаковою ванною і контакту електроду з металевою ванною.

5. Показано, що після виплавки сталі марки 15Х2Г2СВА за допомогою ЕШП значно покращилися її характеристики: ударна в'язкості металу збільшилася в 1,3–1,5 разів при $t=-40^0C$ та в 4–5 разів при $t=-70^0C$. Зокрема, показники пластичності в подовжньому напрямі підвищилися більш ніж на 10%, в поперечному – на 20%, а у вертикальному подовженні збільшилися в 6 разів, а звуження поперечного перетину в середньому в 15 разів.

6. Дослідженнями вмісту домішкових елементів сталі 15Х2Г2СВА при

різних способах виплавки встановлено, що в злитках переплавних процесів розподіл газів рівномірний. У злитку початкового металу відмічений підвищений вміст кисню в периферійних ділянках підприбуткової зони (до 0,015 %) і знижене – в тих же ділянках донної частини (до 0,006%).

7. Дослідженнями забрудненості неметалічними включеннями сталі 15Х2Г2СВА при різних способах виплавки показали, що найбільш низький вміст сульфідів був зафіксований в металі ЕПП та ЕШП: при зниженні вмісту сірки з 0,018% (при ЕШП) до 0,013% (при ЕПП) об'ємний відсоток сульфідів в результаті ЕПП зменшився більш ніж в 12 разів.

8. Виробництво злитків методом ЕШП є надзвичайно перспективним напрямом розвитку світового машинобудування. Питання забезпечення охорони здоров‘я та навколишнього середовища у виробництві злитків повинно знаходиться під суворим контролем державних органів з питань безпеки життєдіяльності та охорони праці. Використання розроблених спеціалістами рекомендацій щодо організації виробництва дозволить зменшити ризики та негативний вплив на людину та довкілля.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Медовар Л. Б., Полішко Г. О., Петренко В. Л., Стовпченко Г. П. Сучасні електрошлакові технологіїпереплаву електроду та переробка рідкого металу (огляд). *Теорія і практика металургії.* 2020. № 2. С. 17–25. https://doi.org/10.34185/tpm.2.2020.03

2. Що таке електрошлаковий переплав? URL: https://www.huiyualloys.com/uk/news/what-is-electroslag-remelting/ (дата звернення: 01.04.2025).

3. Електрошлаковий переплав (Inteco). URL: https://gertnergroup.com/product/elektroshlakovyy-pereplav-inteco/?lang=ua (дата звернення: 01.04.2025).

4. Дефекти кристалічної будови металів. URL: https://sites.google.com/kpel.kiev.ua/rkmaterialoznavstvo/%D0%B3%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B0-%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%BD%D0%BA%D0%B0/%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%BA6-7-%D0%B4%D0%B5%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8-%D0%BA%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%BE%D1%97-%D0%B1%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B8 (дата звернення: 01.04.2025).

5. Воденнікова О. С. Розливка сталі та спеціальні модифікатори, лігатури : конспект лекцій для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія». Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2021. 157 с.

6. Воденніков С. А., Падалка В. П., Воденникова О. С. Технологія розливання і кристалізації сталі : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2011. 188 с.

7. Кащеєв М. А. Теорія та технологія розливки сталі : методичні

вказівки до самостійного вивчення дисципліни для здобувачів вищої освіти освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 136 «Металургія» денної та заочної форм навчання. Кам`янське : ДДТУ, 2018. 16 с.

8. Конспект лекцій з дисципліни «Формування первинної та вторинної структури конструкційних сталей». URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://nmetau.edu.ua/file/lections_primary_and_secondary_structure_formation.pdf (дата звернення: 01.04.2025).

9. Теорія кристалізації та формування виливків : конспект лекцій до вивчення дисципліни для здобувачів третього освітнього рівня, ступеню вищої освіти доктор філософії, що навчаються за ОНП «Металургія», спеціальність 136 – Металургія / Синегін Є. В., Журавльова С. В., Молчанов Л. С., Суховецький С. В. Дніпро : НМетАУ, 2021. 47 с.

10. Ремізов Г. О., Готвянський Ю. Я., Сухенко В. Ю. Електрошлаковий процес. Технологія та устаткування : навч. наочний посібн. для студентів напрямів підготовки 6.050401 «Металургія», 6.050402 «Ливарне виробництво». Київ : НТУУ «КПІ», 2010.

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

12. Стовпченко Г. П., Кадильникова А. В. Електрохімічні процеси при електрошлаковому переплаві (огляд). *Сучасна електрометалургія*. 2021. № 2. С. 3–12.

13. Дослідження технологічності та ефективності нового шлаку для електрошлакового переплаву / Г. П. Стовпченко, С. В. Давидченко, Л. О. Лісова та ін. *Сучасна електрометалургія*. 2020. № 3. С. 11–17.

14. Електрошлаковий переплав витратних електродів змінного перерізу / Л. Б. Медовар, Є. О. Педченко, А. В. Сибір та ін. *Сучасна електрометалургія*. 2020. № 4. С. 3–6. URL: http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001237201

15. Особливості розподілу неметалевих вкраплень при

електрошлаковому наплавленні з великим вмістом сірки / Є. М. Парахнєвич, Є. І. Івахненко, Ю П. Петруша та ін. *Метал і лиття України*. 2024. Т. 32. № 2(337). С. 48–57. https://doi.org/10.15407/steelcast2024.02.006.

16. Парахнєвич Є. М., Сперанський Б. С., Петруша Ю. П. Якісні показники властивостей металу деталей, відновлених електрошлаковим методом. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах* : збірник тез IX міжн. наук.-техн. конф. (18–22 вересня 2000 р.). Запоріжжя : ЗДТУ, 2018. С. 35–36.

17. Парахнєвич Є. М., Петруша Ю. П., Луньов В. В. Особливості технології відновлення деталей електрошлаковим методом. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2003. № 1. С. 60–62.

18. Банашук А. Г., Воденнікова О. С. Вдосконалення виробництва феросиліцію марки ФС-45 у закритих довідновних печах. Матеріали XX науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА. Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості. Т 1. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. С. 3.

19. Банашук А. Г., Воденнікова О. С. Дослідження якості сталі марки 15Х2Г2СВА при різних способах виплавки. *Збірник наукових праць магістрантів кафедри МЧМ*. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. Вип. 11. С. 30–35.

20. Фактори небезпеки в цехах ЕШП. URL: file:///C:/Users/user/Downloads/122011-%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%96-260004-1-10-20180129%20(2).pdf (дата звернення: 01.04.2025).

21. Вахонєва Т. М. Основи охорони праці в Україні : навч. посіб. Київ : ВД «ДАКОР», 2019. 505 с.

22. Ізгородін В. А.Охорона праці на підприємстві : практич. посіб. з розробки та ведення документації. Київ : Видавництво «ФОРТ», 2019. 440 с.

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

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

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

26. Севальнєв А. І., Шаравара Л. П., Черня І. А. Зниження впливу професійних ризиків на здоров'я працівників модернізованого металургійного підприємства. *Запорожский медицинский журнал*. 2015. № 1. С. 87–90. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Zmzh_2015_1_22

27. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ; прийнятий з 01.12.1999 р. №42. Київ, 12 с.

28. ДБН В.1.1.7-2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва.Загальні вимоги ; затверджено та наказом Мінрегіоном України від 31.10.2016 р №237 та введений в дію з 01.06.2017 р. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. 35 с.

29. Забезпечення техногенної безпеки на підприємстві. URL: https://pro-op.com.ua/article/933-pravila-tehnogenno-bezpeki (дата звернення: 01.04.2025).

\