МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(повна найменування вищого навчального закладу)
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
(назва факультету)
КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, ЕКОЛОГІЇ ТА ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота/ проєкт

перший (бакалаврський) рівень вищої освіти
(рівень вищої освіти)

на тему *«Удосконалення технології виплавки неіржавіючої сталі методом електрошлакового переплаву»*

Виконав: студент *4* курсу, групи *6.1363-м-с2*

спеціальності *136 «Металургія»*
(код і назва спеціальності)

освітньо-професійна програма *«Металургія»*
(назва освітньої програми)

Володько Владислав Олександрович
(ініціали та прізвіще)

Керівник *доцент, канд. техн. наук, доцент Воденнікова О.С.*
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент *в.о. зав.кафедри, д-р. техн. наук, професор Бєлоконь Ю.О.*

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

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра ___*металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*____

Рівень вищої освіти_____*перший (бакалаврський) рівень*_____
другий (магістерський) рівень

Спеціальність_____*136 «Металургія»*_____
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма____*Металургія*_____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри
_____*МТЕТБ*_____
_____*Ю.О. Бєлоконь*
"__" _____202_ року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТУ

Володько Владиславу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи)_____*«Удосконалення технології виплавки неіржавіючої сталі методом електрошлакового переплаву»*_____

керівник роботи (проєкту)__*Воденнікова Оксана Сергіївна, канд. техн. наук,*
*доцент*_____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від *"23" 12 2025 р. № 1831-с*

2. Строк подання студентом роботи (проєкта)_____*12.06.2026р.*_____

3. Вихідні дані до роботи (проєкта)___*Науково-технічна література, ДСТУ, патенти.*_____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)__*Реферат. Вступ. Теоретичні основи виплавки неіржавіючої сталі методом електрошлакового переплаву. Дослідження шляхів удосконалення технології виробництва неіржавіючої сталі методом 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. Реферат – 0. Вступ – 1. Розділ 1 – 8. Розділ 2 – 5. Розділ 3 – 0. Загальні висновки – 2.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Теоретичні основи виплавки неіржавіючої сталі методом електрошлакового переплаву	*Воденнікова О.С., доцент*	
Дослідження шляхів удосконалення технології виробництва неіржавіючої сталі методом електрошлакового переплаву	*Воденнікова О.С., доцент*	
Охорона праці та техногенна безпека	*Воденнікова О.С., доцент*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., професор*	

7. Дата видачі завдання *24.12.2025р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	*Реферат. Зміст. Вступ.*		
2	*Теоретичні основи виплавки неіржавіючої сталі методом електрошлакового переплаву*		
3	*Дослідження шляхів удосконалення технології виробництва неіржавіючої сталі методом електрошлакового переплаву*		
4	*Охорона праці та техногенна безпека*		
5	*Загальні висновки. Перелік джерел посилання*		
6	*Графічна частина*		

Студент _____ *Владислав ВОЛОДЬКО*
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 85 с., 34 рис., 12 табл., 50 джерел посилання.

НЕІРЖАВІЮЧА СТАЛЬ, ЕЛЕКТРОШЛАКОВИЙ ПЕРЕПЛАВ, ВИПЛАВКА СТАЛІ, ЯКІСТЬ МЕТАЛУ, ФЛЮС

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: Удосконалення технології виплавки неіржавіючої сталі методом електрошлакового переплаву.

Мета роботи – дослідити та проаналізувати сучасні підходи до удосконалення технології виплавки неіржавіючої сталі методом ЕШП, визначити основні фактори, що впливають на якість металу, продуктивність процесу та енергоефективність виробництва, а також обґрунтувати перспективні напрями підвищення техніко-економічних показників ЕШП для отримання неіржавіючих сталей із покращеними експлуатаційними властивостями.

У розділі 1 наведено загальну характеристику неіржавіючих сталей та вимоги до їх якості, розглянуто фізико-хімічні основи, принцип дії, переваги та недоліки ЕШП, а також проаналізовано його роль у виробництві високоякісних неіржавіючих сталей

У розділі 2 наведено сучасні підходи до вдосконалення технології виплавки нержавіючої сталі методом ЕШП, основні напрями підвищення його техніко-економічних показників, характеристику фізико-механічних та експлуатаційних властивостей сталі AISI 304, особливості її переплаву із застосуванням різних флюсів, а також виконано розрахунок в’язкості флюсів методом рівних сум.

У розділі 3 проаналізовані небезпечні і шкідливих виробничі фактори в процесі ЕШП, запропоновані заходи щодо їх зниження та усунення, приведено розрахунок захисного заземлення та захисного відключення.

ЗМІСТ

ВСТУП…….. 7
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИПЛАВКИ НЕІРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ……..... 9
1.1 Характеристика неіржавіючих сталей та вимоги до їх якості..... 9
1.2 Фізико-хімічні основи, принцип дії, переваги та недоліки електрошлакового переплаву……..…….. 17
1.2.1 Основні фізико-хімічні процеси під час електрошлакового переплаву……..… 17
1.2.2 Сутність і принцип дії електрошлакового переплаву……..…. 20
1.2.3 Переваги та недоліки ЕШП…… 26
1.3 Електрошлаковий переплав в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь»……..... 27
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА НЕІРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ……... 32
2.1 Сучасні підходи до удосконалення технології виплавки неіржавіючої сталі методом ЕШП……. 32
2.2 Напрями підвищення техніко-економічних показників ЕШП……. 33
2.3 Характеристика, фізико-механічні та експлуатаційні властивості неіржавіючої сталі марки AISI 304……...… 35
2.4 Дослідження особливостей електрошлакового переплаву сталі AISI 304 при застосуванні різних флюсів……. 40
2.4.1 Матеріали та методика дослідження……..... 40
2.4.2 Встановлення впливу складу флюсів на режим переплаву та хімічний склад зливків нержавіючої сталі AISI 304, отриманих способом електрошлакового переплаву……..... 45

2.5 Розрахунок в'язкості флюсів для електрошлакового переплаву методом рівних сум…….……...…. 54
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА…….……. 60
3.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів в процесі ЕШП…….. 60
3.2 Заходи щодо зниження та усунення впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів в процесі ЕШП……..... 63
3.3 Заходи з пожежної та техногенної безпеки в процесі ЕШП……..…… 66
3.4 Розрахунок захисного заземлення та захисного відключення…….. 70
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……..... 77
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ……... 80

ВСТУП

Сучасний розвиток металургійної промисловості характеризується постійним зростанням вимог до якості металопродукції, її експлуатаційних властивостей та стабільності хімічного складу. Сортамент сталей, що виплавляється на металургійних підприємствах України, є дуже великим – від конструкційних сталей до спеціальних високолегованих і функціональних матеріалів. Наприклад, неіржавіючі сталі є однією з найважливіших груп сучасних легованих сталей, що характеризуються високою корозійною стійкістю, жароміцністю та довговічністю, що зумовлено їх складом і особливостями структури.

Виплавка неіржавіючих сталей здійснюється різними металургійними способами, серед яких основними є плавка в електродугових печах, індукційна плавка, вакуумно-індукційна плавка, вакуумно-дугова переплавка, а також спеціальні рафінувальні процеси, що дозволяють підвищити чистоту металу та знизити вміст шкідливих домішок. Кожен із цих способів має свої переваги та обмеження щодо енергоспоживання, якості металу та технологічної складності процесу.

Подальше підвищення якості неіржавіючих сталей та покращення їх експлуатаційних характеристик значною мірою пов’язане із застосуванням позапічних методів рафінування та переплаву, серед яких особливе місце займають електрошлакові та вакуумні технології.

Одним із найбільш ефективних способів отримання високоякісних сталей є електрошлаковий переплав (ЕШП), який дозволяє значно покращити чистоту металу за неметалевими включеннями, знизити вміст шкідливих домішок, підвищити щільність зливка та забезпечити рівномірну кристалічну структуру. Проте, незважаючи на значні переваги даної технології, існуючі методи виплавки та переплаву не завжди забезпечують оптимальні енергетичні показники процесу та стабільну якість кінцевого продукту.

У зв’язку з цим актуальним є вдосконалення технології виплавки неіржавіючих сталей із застосуванням електрошлакового переплаву, спрямоване на підвищення якості металу, зниження вмісту шкідливих домішок і неметалевих включень, а також покращення енергетичної ефективності та стабільності технологічного процесу.

Мета роботи – дослідити та проаналізувати сучасні підходи до удосконалення технології виплавки неіржавіючої сталі методом ЕШП, визначити основні фактори, що впливають на якість металу, продуктивність процесу та енергоефективність виробництва, а також обґрунтувати перспективні напрями підвищення техніко-економічних показників ЕШП для отримання неіржавіючих сталей із покращеними експлуатаційними властивостями.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні теоретичні та прикладні завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан та технологічні особливості електрошлакового переплаву як способу отримання високоякісних сталей.

2. Проаналізувати сучасні напрями удосконалення технології електрошлакового переплаву неіржавіючих сталей, зокрема вплив складу флюсів, автоматизації процесу та конструктивних рішень обладнання на якість металу.

3. Оцінити техніко-економічні показники процесу ЕШП та визначити шляхи їх підвищення за рахунок оптимізації електричних режимів і вдосконалення керування процесом переплаву.

4. Розглянути фізико-механічні та експлуатаційні властивості неіржавіючих сталей, зокрема сталі AISI 304, та обґрунтувати її широке промислове застосування.

5. Дослідити вплив складу шлакових флюсів на якість металу при електрошлаковому переплаві сталі AISI 304 та оцінити ефективність різних типів флюсів за показниками металургійної чистоти.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИПЛАВКИ НЕІРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ

1.1 Характеристика неіржавіючих сталей та вимоги до їх якості

Неіржавіючі сталі належать до групи високолегованих сталей, які характеризуються підвищеною корозійною стійкістю в різних агресивних середовищах. Основною ознакою таких сталей є вміст хрому не менше 10,5–12 % (табл. 1), що забезпечує утворення на поверхні металу тонкої захисної оксидної плівки, здатної до самовідновлення при механічних пошкодженнях. Саме ця плівка перешкоджає розвитку корозійних процесів та забезпечує тривалий термін експлуатації виробів.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад поширених марок неіржавіючих сталей згідно з ДСТУ EN 10088-1:2019

Марка сталі	C, не більше	Cr,	Ni	Mo	Mn, не більше	Si, не більше
08Х13	0,08	11,0–13,5	–	–	1,0	1,0
12Х13	0,12	12,0–14,0	–	–	1,0	1,0
20Х13	0,20	12,0–14,0	–	–	1,0	1,0
08Х17	0,08	16,0–18,0	–	–	1,0	1,0
08Х18Н10	0,08	17,0–19,0	8,0–10,5	–	2,0	1,0
03Х18Н11	0,03	17,0–19,0	8,0–12,0	–	2,0	1,0
12Х18Н10Т	0,12	17,0–19,0	9,0–11,0	–	2,0	1,0
03Х17Н14М2	0,03	16,0–18,0	10,0–14,0	2,0–3,0	2,0	1,0

Представлені в табл. 1.1 марки охоплюють основні структурні класи неіржавіючих сталей: мартенситні (12Х13, 20Х13), феритні (08Х13, 08Х17),

аустенітні (08Х18Н10 (рис. 1.1), 03Х18Н11, 12Х18Н10Т, 03Х17Н14М2, 10Х17Н13М2Т) та аустенітно-феритні (08Х22Н6Т).

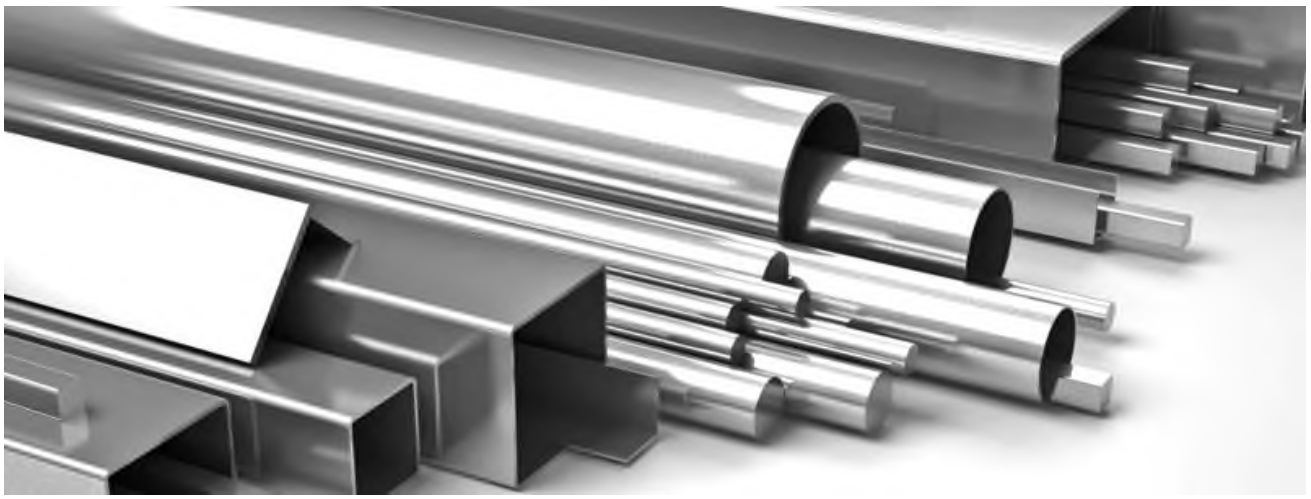


Рисунок 1.1 – Нержавіюча сталь 08Х18Н10

Нержавіючі сталі поділяють на кілька основних груп залежно від їх хімічного складу та структури: мартенситні, феритні, аустенітні, аустенітно-феритні (дуплексні) та дисперсійно-твердіючі.

Мартенситні сталі (С1) характеризуються відносно невеликим вмістом хрому (до 14%), є твердими та магнітними. Вони зміцнюються термічною обробкою (загартуванням і відпусткою) подібно до вуглецевих сталей. Застосовуються переважно для виготовлення столових приладів, ріжучого інструменту та деталей машинобудування, проте мають нижчу корозійну стійкість порівняно з іншими групами, тому рідко використовуються для кріпильних виробів.

Феритні сталі (F1) мають знижений вміст вуглецю, є м’якішими, магнітними та відзначаються обмеженим застосуванням у виробництві кріплення.

Аустенітні сталі (А1–А5) є найбільш поширеними в промисловості. Вони містять приблизно 16–20% хрому та 5–14% нікелю, що забезпечує високу корозійну стійкість, пластичність і технологічність. Ці сталі, як правило, немагнітні або слабомагнітні, добре піддаються обробці тиском,

зварюванню та іншим видам обробки.

Неіржавіючі сталі широко застосовуються в різних галузях промисловості завдяки поєднанню високої корозійної стійкості, міцності та технологічності. Їх використовують для виготовлення обладнання хімічної та нафтохімічної промисловості, харчових виробництв, медичних інструментів, трубопроводів, резервуарів, теплообмінників, деталей енергетичних установок, елементів транспортних засобів та будівельних конструкцій (рис. 1.2). Вибір конкретної марки сталі залежить від умов експлуатації, рівня механічних навантажень, температурного режиму та агресивності робочого середовища.



Рисунок 1.2 – Деталі з нержавіючої сталі

До нормативної бази, що регламентує нержавіючі сталі, належать гармонізовані європейські стандарти, адаптовані в Україні у вигляді ДСТУ EN 10088, які визначають класифікацію, технічні умови постачання та вимоги до різних видів напівфабрикатів і готової продукції з корозійнотривких сталей загального та конструкційного призначення, зокрема:

– ДСТУ EN 10088-1:2019 Сталі нержавкі. Частина 1. Перелік нержавких сталей (EN 10088-1:2014, IDT);

– ДСТУ EN 10088-2:2010 Сталі нержавкі. Частина 2. Лист і стрічка з корозійнотривких сталей загальної призначеності. Технічні умови постачання (EN 10088-2:2005, IDT);

– ДСТУ EN 10088-3:2010 Сталі нержавкі. Частина 3. Напівготова продукція, заготовки, прутки, дріт, профілі та полірована продукція з корозійнотривких сталей загальної призначеності. Технічні умови постачання (EN 10088-3:2005, IDT);

– ДСТУ EN 10088-4:2019 Сталі неіржавкі. Частина 4. Технічні умови постачання тонкого/товстого листа та штаби з корозійнотривких сталей конструкційного призначення (EN 10088-4:2009, IDT);

– ДСТУ EN 10088-5:2019 Сталі неіржавкі. Частина 5. Технічні умови постачання прутків, стрижнів, дроту, профілів та полірованих виробів з корозійнотривких сталей конструкційного призначення (EN 10088-5:2009, IDT).

Закордонними аналогами нержавіючих сталей є марки (табл. 1.2), регламентовані стандартами EN (європейська система позначення сталей), AISI (американська система класифікації сталей) та JIS (японський промисловий стандарт), які мають близький хімічний склад і подібні експлуатаційні властивості, однак не завжди є повними еквівалентами вітчизняних марок.

Важливими легувальними елементами неіржавіючих сталей є хром, нікель, молібден, титан, ніобій та азот. Хром забезпечує корозійну стійкість,

нікель стабілізує аустенітну структуру та підвищує пластичність, молібден покращує стійкість до локальної корозії, а титан і ніобій запобігають міжкристалітній корозії шляхом зв'язування вуглецю у стійкі карбіди. Азот додатково підвищує міцність і корозійну стійкість сталі, сприяючи зміцненню аустенітної структури та стабілізації механічних властивостей. Сукупний вплив цих легувальних елементів забезпечує формування комплексу експлуатаційних характеристик нержавіючих сталей, зокрема високої корозійної стійкості, міцності, пластичності та довговічності в різних умовах роботи.

Таблиця 1.2 – Аналоги нержавіючих сталей

Клас сталі	ДСТУ (Україна)	EN (ЄС)	AISI (США)	JIS (Японія)
Аустенітні	12Х18Н10Т	1.4541	321	SUS321
	08Х18Н10	1.4301	304	SUS304
	03Х17Н14М2	1.4404	316L	SUS316L
	10Х17Н13М2Т	1.4571	316Ti	SUS316Ti
Феритні	08Х13	1.4000	410	—
	12Х17	1.4016	430	—
Мартенситні	20Х13	1.4021	420	—

Фізико-механічні властивості неіржавіючих сталей (табл. 1.3) визначаються їх структурним класом і хімічним складом. Найбільш поширені аустенітні сталі типу 08Х18Н10 (AISI 304) характеризуються границею міцності σв = 520–750 МПа, границею текучості $\sigma_{0,2}$ = 210–260 МПа, відносним видовженням δ = 40–60 %, звуженням ψ = 55–70 % та твердістю НВ 140–200. Для аустенітних сталей, легованих молібденом, наприклад 03Х17Н14М2 (AISI 316L), границя міцності становить 520–690 МПа, границя текучості – 220–300 МПа, а відносне видовження досягає 40–55 %. Мартенситні сталі, такі як 20Х13, після гартування та відпуску мають

значно вищу міцність: $\sigma_в$ = 700–1000 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 500–800 МПа, твердість НВ 200–300, проте їх пластичність нижча і зазвичай становить δ = 10–20 %. Для дуплексних неіржавіючих сталей характерне поєднання високої міцності та корозійної стійкості: границя міцності досягає 650–900 МПа, границя текучості – 450–650 МПа, а відносне видовження становить 20–35 %. Крім того, неіржавіючі сталі зберігають високі механічні властивості в широкому інтервалі температур, а ударна в'язкість аустенітних сталей за кімнатної температури може перевищувати 200 Дж/см², що забезпечує їх надійну роботу в складних умовах експлуатації.

Таблиця 1.3 – Механічні властивості поширених марок неіржавіючих сталей

Марка сталі	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	Твердість, НВ
08Х13	420–600	220–300	18–25	130–180
12Х13	450–650	240–350	15–22	140–200
20Х13	700–1000	500–800	10–20	200–300
08Х17	450–650	250–350	20–30	140–190
08Х18Н10	520–750	210–260	40–60	140–200
03Х18Н11	480–700	170–240	40–60	130–190
12Х18Н10Т	530–750	220–280	40–55	140–200
03Х17Н14М2	520–690	220–300	40–55	140–220

Якість неіржавіючих сталей визначається сукупністю хімічних, структурних, механічних та експлуатаційних показників. Однією з головних вимог є точне дотримання заданого хімічного складу, оскільки навіть незначні відхилення можуть суттєво вплинути на корозійну стійкість і механічні властивості металу. Для більшості аустенітних неіржавіючих сталей вміст хрому повинен перебувати в межах 17–19 %, нікелю – 8–12 %, а вуглецю не перевищувати 0,08 %, тоді як для низьковуглецевих марок

(03Х18Н11, 03Х17Н14М2) його вміст обмежується 0,03 %. Особливу увагу приділяють вмісту шкідливих домішок, насамперед сірки та фосфору. У високоякісних неіржавіючих сталях вміст сірки зазвичай не перевищує 0,015–0,030 %, а фосфору – 0,020–0,045 %. Для сталей спеціального призначення, які використовуються в атомній енергетиці, хімічному машинобудуванні та медичній техніці, вміст сірки та фосфору може бути знижений до 0,010 % і менше. Перевищення допустимого вмісту цих домішок призводить до зниження пластичності на 10–20 %, ударної в'язкості на 15–30 %, а також погіршення стійкості до міжкристалітної та локальної корозії. Крім того, високоякісні неіржавіючі сталі повинні характеризуватися низьким вмістом газів: концентрація кисню зазвичай не перевищує 0,003–0,008 %, азоту – 0,05–0,20 % (залежно від марки), а водню – 0,0002–0,0008 %, що забезпечує високу щільність металу та мінімальну схильність до утворення внутрішніх дефектів.

До основних експлуатаційних характеристик неіржавіючих сталей належать корозійна стійкість, жаростійкість, жароміцність, зносостійкість, довговічність та здатність працювати в широкому діапазоні температур. Аустенітні сталі типу 08Х18Н10 та 12Х18Н10Т зберігають високу пластичність і ударну в'язкість за температур від –196 °С до +600 °С, що дозволяє використовувати їх у кріогенній техніці та високотемпературних установках. Жаростійкі хромонікелеві сталі здатні тривалий час працювати в окиснювальному середовищі при температурах 800–1000 °С, а жароміцні марки – витримувати механічні навантаження при температурах 600–750 °С без істотної втрати міцності. Швидкість атмосферної корозії неіржавіючих сталей становить менше 0,01 мм/рік, що у 50–100 разів менше порівняно з вуглецевими сталями. У багатьох агресивних середовищах, зокрема в розчинах органічних кислот та харчових продуктах, корозійні втрати не перевищують 0,001–0,005 мм/рік. Термін експлуатації виробів із неіржавіючих сталей у звичайних атмосферних умовах може становити 30–50 років, а в окремих випадках перевищувати 100 років. Висока стійкість до

міжкристалітної, щілинної та точкової корозії (рис. 1.3) забезпечує надійну роботу обладнання хімічної, харчової, енергетичної та медичної промисловості протягом тривалого часу без суттєвого погіршення експлуатаційних характеристик.

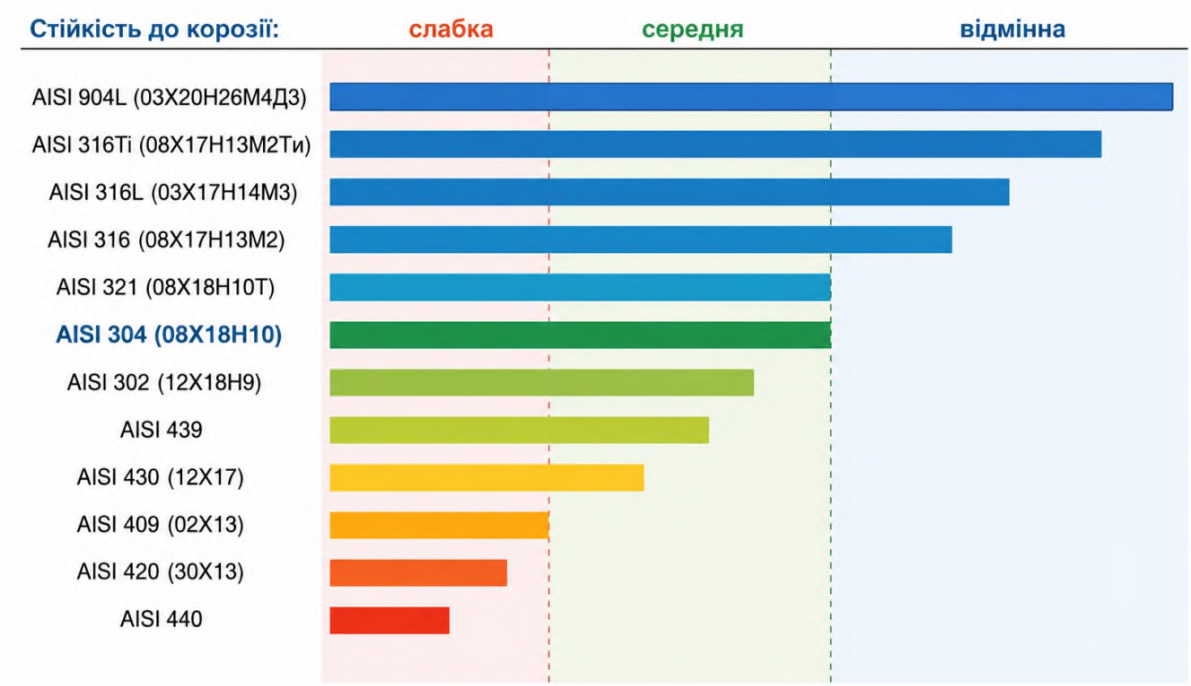


Рисунок 1.3 – Стійкість до корозії неіржавіючих сталей

Забезпечення високої якості неіржавіючих сталей потребує застосування сучасних металургійних технологій, серед яких важливе місце займає електрошлаковий переплав. Цей процес сприяє додатковому рафінуванню металу, зменшенню кількості неметалевих включень, підвищенню структурної однорідності та покращенню комплексу механічних і корозійних властивостей готової продукції.

Виплавляють нержавіючі сталі переважно електрометалургійними методами, що забезпечують високу чистоту металу та точне регулювання хімічного складу. Основними способами є виплавка в дугових сталеплавильних печах (ДСП), індукційних печах, а також спеціальні методи позапічного рафінування, такі як вакуумно-індукційний переплав (ВІП), вакуумно-дуговий переплав (ВДП) та електрошлаковий переплав (ЕШП).

1.2 Фізико-хімічні основи, принцип дії, переваги та недоліки електрошлакового переплаву

Електрошлаковий переплав є вторинним процесом рафінування металів і сплавів, який використовується для додаткового очищення після первинної металургійної обробки та видалення основної частини домішок. Електрошлаковий переплав використовується для сталей з підвищеними вимогами до чистоти, однорідності структури та високих механічних властивостей, зокрема інструментальних, конструкційних, легованих, високолегованих, нержавіючих, жароміцних та спеціальних сталей.

1.2.1 Основні фізико-хімічні процеси під час електрошлакового переплаву

Електрошлаковий переплав є складним металургійним процесом, під час якого одночасно відбуваються теплові, фізичні та фізико-хімічні явища, що забезпечують рафінування металу та формування високоякісного зливка.

Основні фізико-хімічні процеси, які протікають під час ЕШП, наступні:

1. Нагрівання та плавлення електрода

При проходженні електричного струму через електропровідний шлаковий розплав у ньому виділяється теплота за законом Джоуля–Ленца. За рахунок цієї теплоти відбувається поступове оплавлення витратного електрода та утворення крапель рідкого металу. Краплі металу проходять через шар рідкого шлаку, нагріваються та очищуються від небажаних домішок.

2. Рафінування металу від неметалевих включень

Однією з основних переваг ЕШП є ефективне очищення металу від неметалевих включень. Під час проходження через шлакову ванну оксидні та сульфідні включення взаємодіють зі шлаком і переходять до нього.

Зокрема, оксиди алюмінію та кремнію можуть зв'язуватися з оксидом кальцію:

$$(Al_2O_3)+(CaO)\rightarrow(CaO\cdot Al_2O_3)$$

$$(SiO_2)+(CaO)\rightarrow(CaSiO_3)$$

У результаті цього підвищується чистота металу та покращуються його механічні властивості.

3. Десульфурація металу

Важливим фізико-хімічним процесом є видалення сірки зі сталі. Основні шлаки мають високу здатність поглинати сірку, яка переходить із металу в шлакову фазу:

$$[FeS]+(CaO)=(CaS)+(FeO)$$

або

$$[S]+(CaO)=(CaS)+[O]$$

Зменшення вмісту сірки сприяє підвищенню пластичності, ударної в'язкості та тріщиностійкості сталі.

4. Окисно-відновні реакції

Між металом і шлаком постійно відбуваються реакції окиснення та відновлення різних елементів. Для неіржавіючих сталей особливо важливим є збереження хрому та інших легувальних компонентів. За надмірної окиснювальної здатності шлаку можливі реакції:

$$[Cr]+(FeO)=(CrO)+[Fe]$$

$$[Mn]+(FeO)=(MnO)+[Fe]$$

$$[Si]+2(FeO)=(SiO_2)+2[Fe]$$

Для підтримання необхідного хімічного складу металу важливим є контроль окиснювального потенціалу шлаку.

5. Розкиснення металу

Зниження вмісту кисню в сталі відбувається внаслідок взаємодії кисню з елементами-розкиснювачами:

$$2[Al]+3[O]=(Al_2O_3)$$

$$[Si]+2[O]=(SiO_2)$$

$$[Mn]+[O]=(MnO)$$

Утворені оксиди переходять до шлаку або видаляються разом із неметалевими включеннями, що сприяє підвищенню якості сталі.

6. Дегазація металу

Під час переплаву відбувається часткове видалення розчинених газів, насамперед водню та азоту:

$$2[H]=H2\uparrow$$

$$2[N]=N2\uparrow$$

Зменшення газонасиченості металу знижує ймовірність утворення пористості, флокенів та інших внутрішніх дефектів.

7. Тепломасообмін між металом і шлаком

У процесі руху металевих крапель через шлак відбувається інтенсивний тепло- та масообмін між фазами. Завдяки великій площі контакту створюються сприятливі умови для протікання рафінувальних процесів, вирівнювання температури та очищення металу від домішок.

8. Кристалізація та формування структури зливка

Після проходження через шлак очищений метал накопичується у

водоохолоджуваному кристалізаторі, де відбувається його спрямована кристалізація. Високий температурний градієнт забезпечує формування щільного зливка з мінімальною ліквацією, низькою пористістю та дрібнозернистою структурою. Це позитивно впливає на механічні властивості, корозійну стійкість та довговічність неіржавіючих сталей.

1.2.2 Сутність і принцип дії електрошлакового переплаву

Суть електрошлакового переплаву полягає у повторному переплавленні попередньо виготовленого металевого електрода в середовищі рідкого електропровідного шлаку. Під час проходження через шлакову ванну краплі розплавленого металу очищуються від неметалевих включень, сірки, газів та інших небажаних домішок. Завдяки цьому забезпечується отримання металу високої чистоти, однорідної структури та покращених механічних і корозійних властивостей. Процес ЕШП поєднує рафінування металу та його спрямовану кристалізацію, що дозволяє отримувати зливки високої якості з мінімальною кількістю внутрішніх дефектів.

Схема електрошлакового переплаву представлена на рис. 1.4.

Як вихідний матеріал зазвичай застосовують суцільний витратний електрод, виготовлений із первинного металу. Такий електрод може бути отриманий литтям, пластичною деформацією або сформований із металобрухту. Процес здійснюється у водоохолоджуваному кристалізаторі, в якому знаходиться шлакова ванна, що нагрівається внаслідок проходження електричного струму між електродом і піддоном.

Коли температура шлаку перевищує температуру плавлення металу, кінець електрода починає плавитися, а утворені краплі металу проходять через шлакову ванну. Під час цього відбувається інтенсивне рафінування металу, після чого очищений розплав накопичується в нижній частині кристалізатора та поступово кристалізується, формуючи злиток.

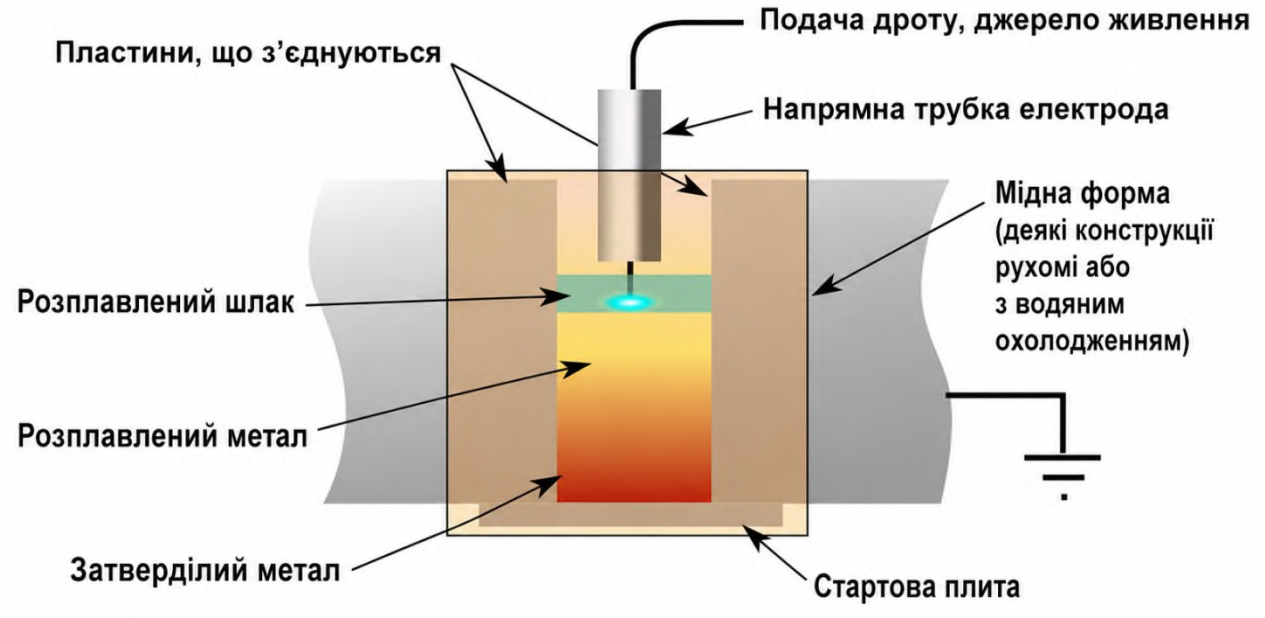


Рисунок 1.4 – Схема електрошлакового переплаву

На установках електрошлакового переплаву компанії INTECO (рис. 1.5 та рис. 1.6) виготовляється широкий сортамент зливків різних типорозмірів масою до 250 тонн.

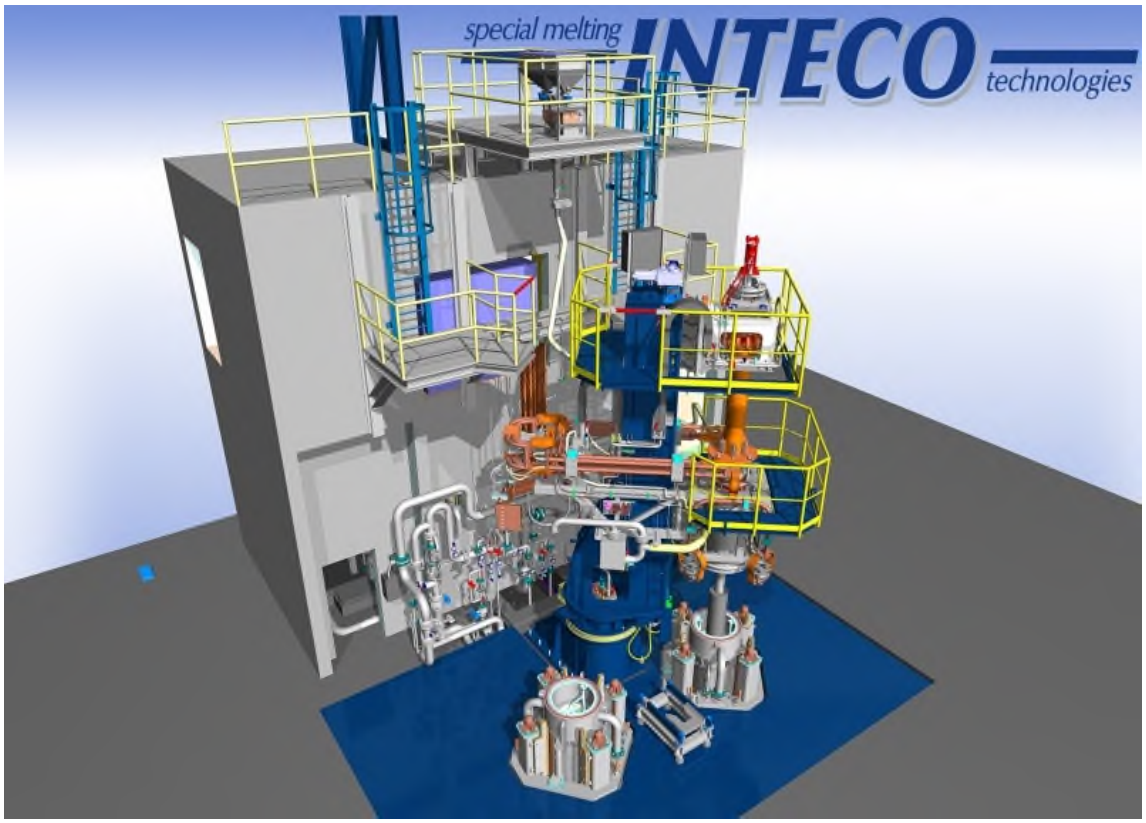


Рисунок 1.5 – Електрошлаковий переплав (Inteco) (вид у 3D)



Рисунок 1.6 – Електрошлаковий переплав (Inteco)

У міру протікання процесу електрод безперервно подається в зону плавлення, а злиток нарощується в напрямку, протилежному руху електрода. Рідкий шлак переміщується до верхньої частини зони плавлення, де контактує зі стінками водоохолоджуваного кристалізатора і твердне, утворюючи захисну шлакову кірку між стінкою форми та поверхнею злитка.

Під час затвердіння злитка ця кірка періодично відшаровується, що сприяє формуванню поверхні високої якості з мінімальною кількістю дефектів та покращеними експлуатаційними властивостями готового металу.

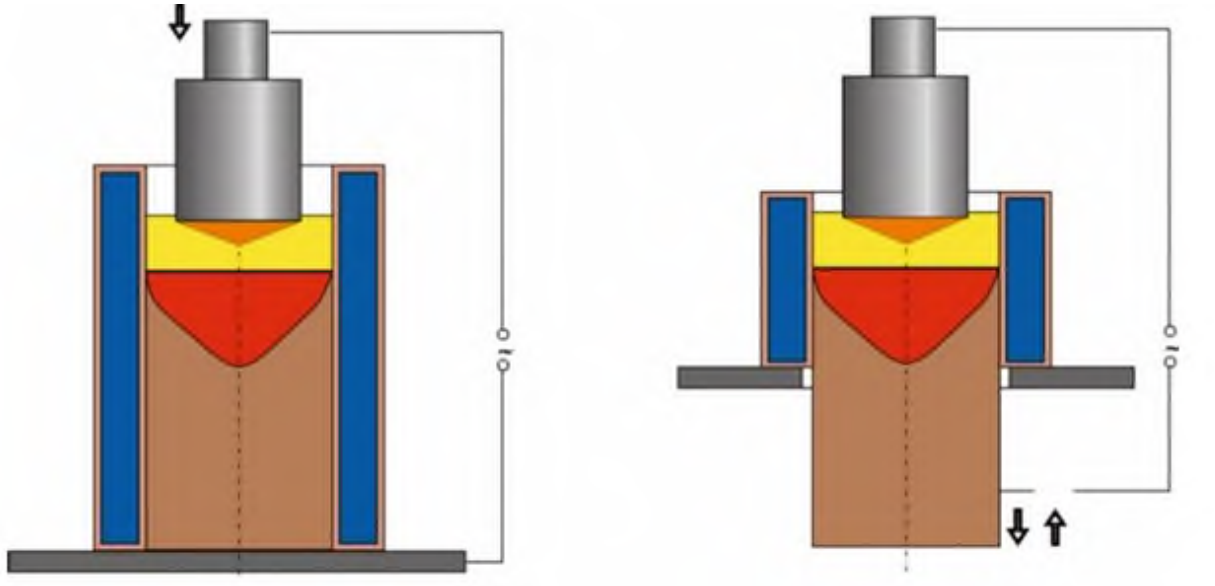
Швидкість формування злитка в процесі ЕШП є меншою, ніж в процесах розливки рідкого металу в злитки або на безперервно литу заготовку в традиційній металургії. Навмисне суттєве скорочення потенційної продуктивності процесу плавлення робиться задля високої якості виробу – запобігання ліквацийного перерозподілу елементів і утворенню усадкових дефектів. ЕШП може проводитися у водоохолоджувальному кристалізаторі (стаціонарному з його заповненням (рис. 1.7, а) або в короткому з витягуванням зливка донизу або рухом доверху (рис. 1.7, б)). Схема ЕШП РМ суцільних і порожнистих зливків представлена на рис. 1.8.

Технології ЕШП активно розробляються та досліджуються в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. Насамперед ведуться роботи з удосконалення режимів електрошлакового переплаву, спрямовані на підвищення якості металу, зниження вмісту шкідливих домішок та покращення однорідності структури злитків. Окрему увагу приділяють створенню нових шлакових систем, оптимізації теплових і електричних параметрів процесу, а також розробленню сучасного обладнання для автоматизації та стабілізації переплаву.

ЕШП дозволяє отримувати високоякісні вироби з інструментальних, конструкційних, високоміцних сталей, нержавіючих теплостійких та

жаростійких сталей, сплавів на нікелевій основі та суперсплавів (рис. 1.9), при тому загальний об’єм виробництва електрошлакових сталей постійно зростає.

Отримані методом ЕШП злитки характеризуються підвищеною щільністю, низьким вмістом неметалевих включень і високою структурною однорідністю. Це забезпечує покращення механічних властивостей металу, підвищення його корозійної стійкості та довговічності в експлуатації.



а б

а – ЕШП в стаціонарному кристалізаторі з його заповненням,

б – ЕШП в короткому кристалізаторі

Рисунок 1.7 – Схема класичного ЕШП

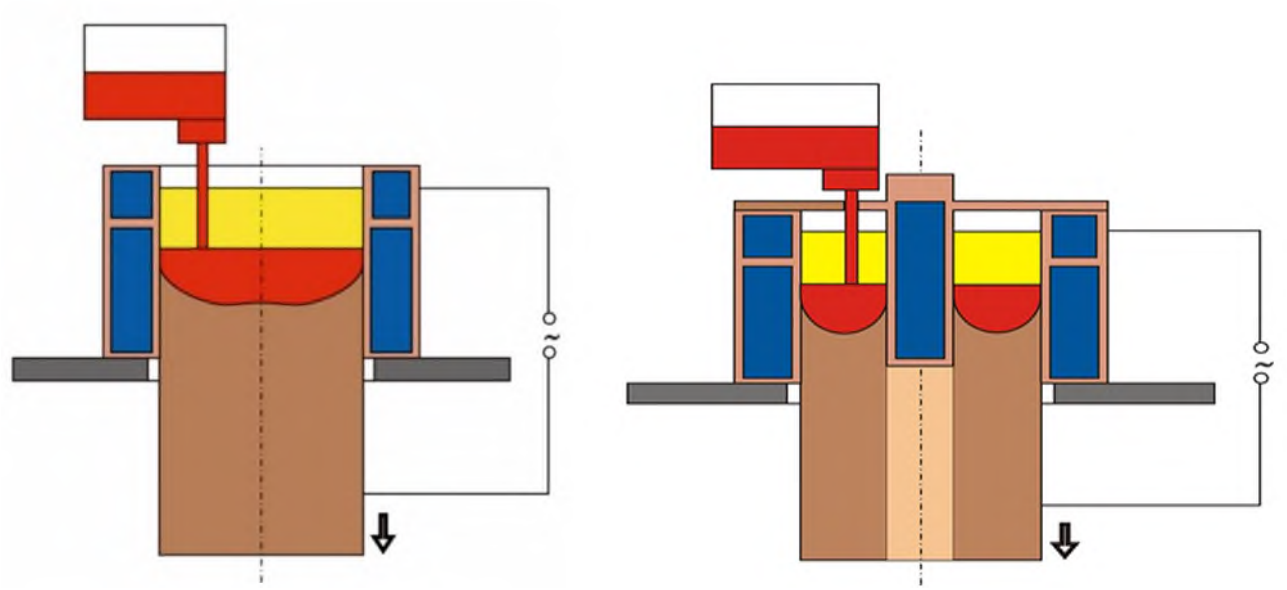
Основні технологічні процеси без витратних електродів представлено наступними різновидами:

– порційна електрошлакова виливка (ПЕШВ) (технологія яка розроблена на основі використання електрошлакової технології з невитратним графітованим електродом);

– електрошлакове наплавлення (ЕШН) дискретними матеріалами (дріб, порошок, стружка тощо). Наплавлення відбувається в

струмопідвідному кристалізаторі, до якого підведено струм і який є секційним неплавким електродом.;

– з подачею рідкого металу (ЕШП РМ), в тому числі електрошлакове безперервне лиття і виробництво методом ЕШП композитних виробів (ЕШН РМ, ЕШН РПМ) (валки, листовий прокат, труби, ротори та ін.)/



а б

Рисунок 1.8 – Схема ЕШП РМ суцільних (а) і порожнистих зливків (б)



Рисунок 1.9 – Використання ЕШП у світі

1.2.3 Переваги та недоліки ЕШП

ЕШП має низку суттєвих переваг, завдяки яким він широко використовується для виробництва високоякісних сталей і сплавів спеціального призначення. Насамперед цей процес забезпечує ефективне очищення металу від неметалевих включень, зниження вмісту сірки та інших шкідливих домішок. У результаті формується щільний злиток із мінімальною пористістю та усадковими дефектами, а також однорідною макро- та мікроструктурою. ЕШП сприяє покращенню механічних властивостей металу, зокрема його пластичності, в'язкості, міцності та довговічності. Важливою перевагою процесу є спрямована кристалізація металу, яка забезпечує зменшення ліквацийних явищ та високу структурну однорідність зливка. Крім того, технологія дозволяє отримувати високоякісні леговані, інструментальні, жароміцні та неіржавіючі сталі, а також великогабаритні зливки без значних внутрішніх дефектів. За умови дотримання технологічних режимів забезпечується висока відтворюваність якості металопродукції.

Разом із тим електрошлаковий переплав має певні недоліки. Процес характеризується значною енергоємністю та потребує суттєвих капітальних витрат на спеціалізоване обладнання. Його продуктивність зазвичай нижча порівняно з деякими методами масового виробництва сталі. Важливою умовою успішного проведення переплаву є ретельний контроль складу та властивостей шлаку, а також використання високоякісних витратних електродів. До недоліків також належать підвищені вимоги до кваліфікації персоналу, додаткові витрати на підготовку електродів і шлакових сумішей, а також відносно тривалий виробничий цикл. У деяких випадках виникають обмеження щодо розмірів і форми одержуваних зливків, що визначаються конструктивними особливостями електрошлакових установок.

Незважаючи на наявні недоліки, ЕШП залишається одним із найефективніших способів отримання високоякісних неіржавіючих та

спеціальних сталей. Його застосування є економічно та технологічно доцільним у випадках, коли до металу висуваються підвищені вимоги щодо чистоти, однорідності структури, механічних властивостей і надійності в експлуатації.

1.3 Електрошлаковий переплав в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь»

В Україні установки електрошлакового переплаву є на ПрАТ «Дніпроспецсталь» (рис. 1.7 та рис. 1.8). Зокрема, сталеплавильний цех №5 (СПЦ-5) обладнаний печами ЕШП і ВДП різної місткості, що дають змогу отримувати сортові зливки масою 0,9–6,0 тонн. На базі цього виробничого комплексу було розроблено, освоєно та впроваджено без залучення сторонніх організацій технологію виробництва кувальних зливків ЕШП масою 6 т і діаметром 800 мм із марок сталей Х12МФ-Ш, 13Х11Н2В2МФ-Ш (ЕІ961-Ш), 15Х12Н2МВФАБ-Ш (ЕП517-Ш), 08Х18Н10Т-Ш.

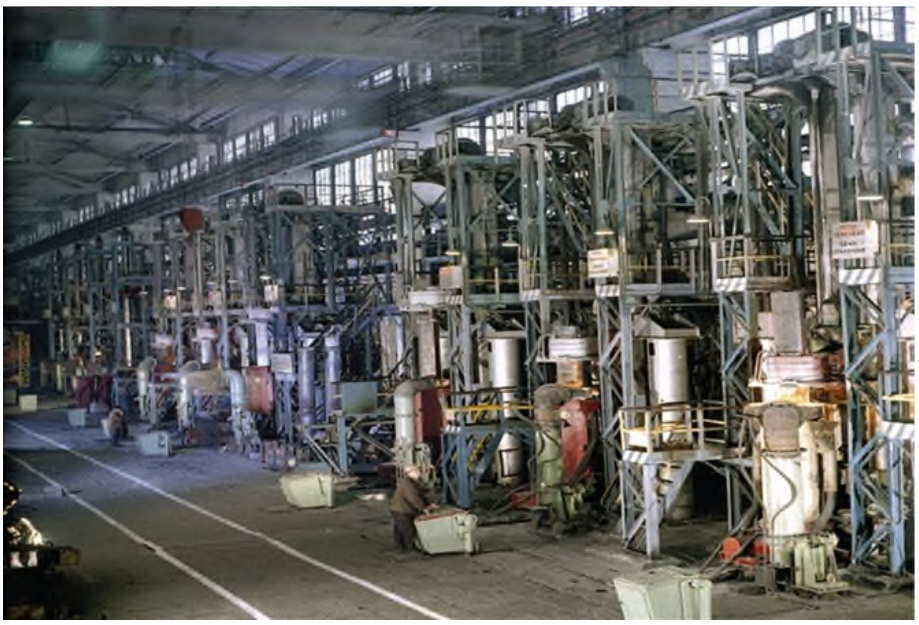


Рисунок 1.7 – Відділення сортових печей ЕШП в умовах сталеплавильного цеху №5 ПрАТ «Дніпроспецсталь»

СПЦ-5 ПрАТ «Дніпроспецсталь» має значний парк обладнання для ЕШП і виробляє сталеві зливки підшипникових сталей ШХ15-Ш, ШХ15СГ-Ш, швидкорізальних Р6М5-Ш, конструкційних 12Х2Н4А-Ш, 18Х2Н4МА-Ш, нержавіючих 13Х15Н4АМ3-Ш (ЕП310-Ш), 15Х16Н2АМ-Ш (ЕП479-Ш), корозійностійких 08Х18Н10Т-Ш, інструментальних 4Х5МФ1С-Ш, 3Х3М3Ф-Ш та інших марок сталей масою зливків від 0,8 до 20 т (рис. 1.9–1.12).

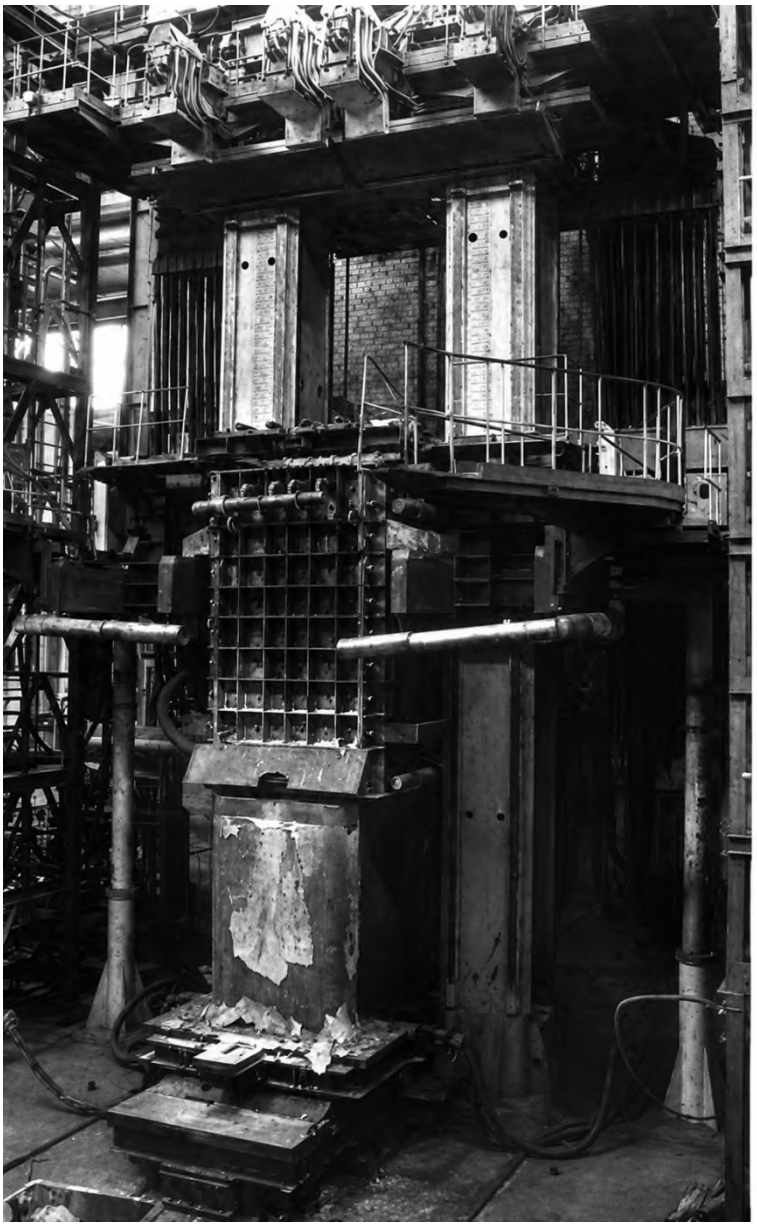


Рисунок 1.8 – Загальний вигляд листової печі ЕШП У-436 з виплавленим зливком



Рисунок 1.9 – Зливки зі сталі 08Х18Н10Т-Ш перетином квадрат 565 мм і масою 4,3 т



а б

Рисунок 1.10 – Зливом зі сталі Х12МФ-Ш діаметром 800 мм та масою 6 т (а) та зливок зі сталі ШХ15СГ-Ш перетином квадрат 565 мм під час витягування з кристалізатора (б)



Рисунок 1.11 – Електрод зі сталі ЧС82-Ш після приварювання інвентаря



Рисунок 1.12 – Зливок зі сталі ЧС82-Ш перетином квадрат 565 мм під час витягування з кристалізатора

Освоєно виробництво високоборної марки сталі 04Х14Т3Р1Ф-Ш (ЧС 82-Ш) із вмістом бору понад 1,5 % для атомної енергетики (рис. 1.12). Розроблено та впроваджено технології долегування під час ЕШП кремнієм і титаном, ЕШП на синтетичному флюсі, який у два рази дешевший за фабричний плавлений, що підвищило конкурентоспроможність продукції ЕШП. При цьому технологія виробництва прокату та поковок із електрошлакового металу ПрАТ «Дніпроспецсталь» відповідає високим стандартам якості.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА НЕІРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВУ

2.1 Сучасні підходи до удосконалення технології виплавки неіржавіючої сталі методом ЕШП

Сучасні підходи до удосконалення технології виплавки неіржавіючої сталі методом ЕШП спрямовані на підвищення якості металу, зменшення вмісту неметалевих включень, покращення структури злитків та зниження виробничих витрат. Одним із головних напрямів є оптимізація складу шлакових сумішей, які забезпечують ефективне рафінування металу, захист розплаву від взаємодії з атмосферою та стабільність процесу переплаву.

Для переплаву неіржавіючих сталей найчастіше застосовують шлаки на основі фториду кальцію (CaF_2), до складу яких також входять оксид кальцію (CaO), оксид алюмінію (Al_2O_3), оксид магнію (MgO), а в окремих випадках і діоксид кремнію (SiO_2). Найбільш поширеними є шлакові системи CaF_2-CaO-Al_2O_3 та CaF_2-CaO-Al_2O_3-MgO. Фторид кальцію забезпечує необхідну електропровідність і рідкотекучість шлаку, оксид кальцію сприяє десульфурації металу та видаленню неметалевих включень, оксид алюмінію стабілізує фізико-хімічні властивості шлакової ванни, а оксид магнію підвищує стійкість шлаку до взаємодії з футерівкою та металом. Правильний підбір співвідношення цих компонентів дає змогу підвищити ступінь очищення металу, зменшити втрати легувальних елементів і забезпечити формування однорідної структури злитка.

Важливим напрямом удосконалення є застосування сучасних автоматизованих систем керування процесом ЕШП. Використання комп'ютеризованих систем контролю дозволяє в режимі реального часу регулювати силу струму, напругу, швидкість подачі електрода та швидкість кристалізації металу, що сприяє отриманню злитків із рівномірною

структурою та мінімальною кількістю дефектів.

Значна увага приділяється вдосконаленню конструкцій кристалізаторів і систем охолодження. Оптимізація умов тепловідведення забезпечує сприятливий перебіг процесу кристалізації, зменшує ліквацийні явища, пористість та інші внутрішні дефекти, підвищуючи однорідність металу по всьому об'єму злитка.

Перспективним напрямом є використання синтетичних флюсів нового покоління, які характеризуються високою рафінувальною здатністю та нижчою собівартістю порівняно з традиційними плавленими шлаками. Для переплаву високолегованих неіржавіючих сталей застосовують шлаки зі зниженим вмістом оксидів кремнію та заліза, що сприяє кращому збереженню хрому, нікелю та інших легувальних елементів у металі. Також використовуються технології долегування металу безпосередньо під час переплаву, що дозволяє точніше регулювати хімічний склад і покращувати експлуатаційні властивості сталі.

Для виробництва особливо відповідальних виробів усе ширше використовуються комбіновані технології, які поєднують ЕШП з вакуумною обробкою металу. Такі технологічні схеми забезпечують додаткове видалення газів і шкідливих домішок, підвищуючи корозійну стійкість, пластичність, ударну в'язкість і довговічність неіржавіючих сталей. Таким чином, сучасне удосконалення технології ЕШП базується на комплексному вдосконаленні шлакових систем, автоматизації процесу, оптимізації умов кристалізації та впровадженні нових технологічних рішень, що дозволяють отримувати високоякісні неіржавіючі сталі з покращеними експлуатаційними характеристиками.

2.2 Напрями підвищення техніко-економічних показників ЕШП

Основними напрямами підвищення техніко-економічних показників електрошлакового переплаву є зниження енерговитрат, підвищення

продуктивності процесу та покращення якості металу. Одним із найефективніших заходів є оптимізація електричного режиму переплаву шляхом вибору раціональних значень сили струму, напруги та швидкості плавлення електрода. Для установок ЕШП середньої потужності сила струму зазвичай становить 8–25 кА, напруга 25–60 В, а швидкість переплаву – 0,3–1,5 т/год залежно від діаметра електрода та марки сталі. Правильний вибір цих параметрів дозволяє знизити питомі витрати електроенергії до 900–1500 кВт·год/т металу, що на 10–20 % менше порівняно з неоптимізованими режимами. Одночасно підвищується продуктивність агрегату та зменшується тривалість плавки, що сприяє зниженню собівартості готової продукції.

Для неіржавіючих сталей типу 08Х18Н10Т-Ш на установках ЕШП продуктивність зазвичай становить 0,6–1,2 т/год, а вихід придатного металу досягає 95–98 %. Це забезпечує високу економічну ефективність процесу та отримання злитків із мінімальною кількістю внутрішніх дефектів і неметалевих включень.

Важливим напрямом є застосування сучасних синтетичних шлаків, які мають високу рафінувальну здатність і нижчу вартість порівняно з традиційними плавленими флюсами. Це дає змогу зменшити витрати на шлакоутворювальні матеріали та одночасно підвищити якість металу.

Суттєвого економічного ефекту можна досягти завдяки автоматизації та цифровому контролю процесу ЕШП. Автоматичне регулювання швидкості подачі електрода, рівня шлакової ванни та електричних параметрів забезпечує стабільність процесу, зменшує кількість браку та підвищує вихід придатної продукції.

Перспективним напрямом є вдосконалення конструкції кристалізаторів і систем охолодження. Оптимізація теплових умов кристалізації сприяє підвищенню швидкості переплаву, зменшенню витрат води та покращенню структури злитків.

Підвищенню техніко-економічних показників також сприяє

використання якісних витратних електродів, удосконалення технології підготовки шихтових матеріалів та застосування комбінованих процесів ЕШП із позапічною обробкою металу. Це дозволяє отримувати метал із низьким вмістом неметалевих включень і газів без додаткових витрат на подальше рафінування.

2.3 Характеристика, фізико-механічні та експлуатаційні властивості неіржавіючої сталі марки AISI 304

Сталь марки AISI 304 – це корозійностійка конструкційна неіржавіюча сталь, яка характеризується високою пластичністю, кислотостійкістю та добрими механічними властивостями. Вона поєднує жароміцність і здатність працювати за низьких температур, зберігаючи міцність навіть за тривалого теплового впливу. Завдяки високій корозійній стійкості сталь AISI 304 широко використовується як у промисловості, так і для виготовлення кухонного обладнання, побутових виробів та ємностей різного призначення. Матеріал має широкий спектр застосування в різних галузях і випускається у вигляді листового прокату, дроту, труб, а також сортового прокату.

Хімічний склад сталі AISI 304, наведений на рис. 2.1, свідчить про її характерні особливості. Сталь містить відносно невелику кількість вуглецю – не більше 0,08 %, що сприяє підвищенню її корозійної стійкості та зварюваності. Як і інші представники аустенітних неіржавіючих сталей серії 300, вона має аустенітну структуру, яка формується завдяки вмісту нікелю. Підвищена концентрація хрому забезпечує високу стійкість матеріалу до корозії та впливу агресивних середовищ, зокрема кислот, розчинників, спиртів та інших хімічно активних речовин.

Позначення сталі за класифікацією Американського інституту сталі та сплавів (AISI) свідчить про її належність до аустенітних неіржавіючих сталей серії 3xx. Цифра «3» вказує на аустенітний клас сталі, тоді як дві

наступні цифри є порядковим номером конкретної марки в межах цієї групи. Аналогами сталі AISI 304 є низка неіржавіючих аустенітних сталей, що випускаються за різними національними та міжнародними стандартами. Зокрема, відповідно до європейського стандарту EN її аналогом є сталь 1.4301 (X5CrNi18-10), за німецьким стандартом DIN – X5CrNi18-10, за японським стандартом JIS – SUS 304, а за українськими та міждержавними стандартами найближчим аналогом вважається сталь 08Х18Н10 (табл. 2.1). Усі зазначені марки характеризуються високою корозійною стійкістю, доброю пластичністю, технологічністю та придатністю до зварювання.

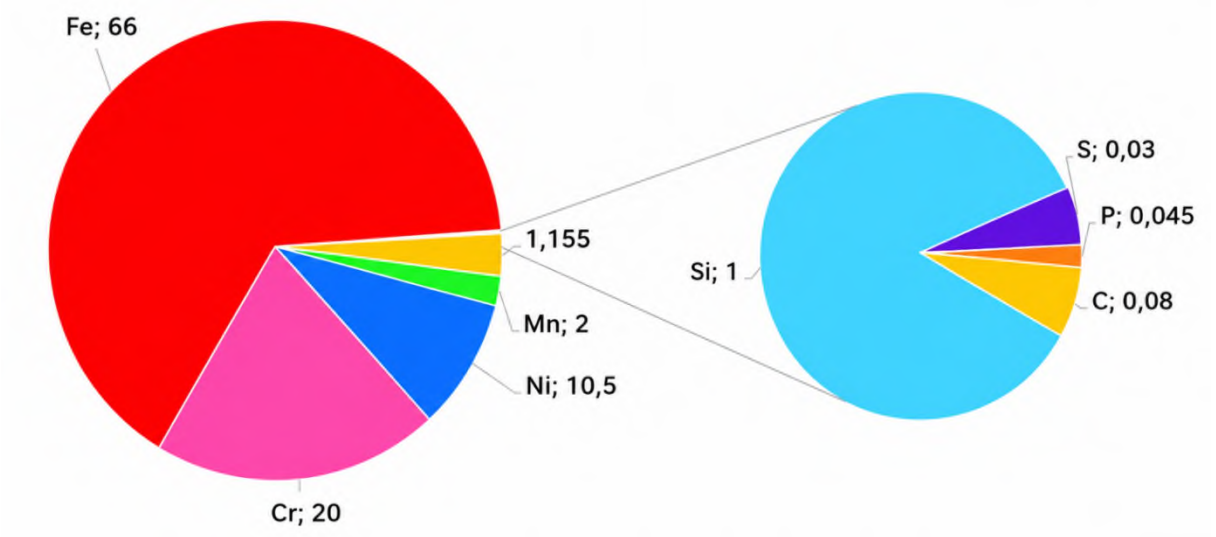


Рисунок 2.1 – Хімічний склад сталі марки AISI 304

Сталь AISI 304 широко використовується для виготовлення як зварних, так і збірних металоконструкцій завдяки поєднанню високої корозійної стійкості, міцності та технологічності. Крім того, її застосовують у виробництві біметалевих виробів, лабораторного та столового посуду, трубопровідних систем для хімічної та фармацевтичної промисловості. З цього матеріалу також виготовляють труби різного призначення та рулони холоднокатаного і гарячекатаного прокату зі сталі AISI 304 (рис. 2.2 та рис. 2.3), які широко використовуються у будівництві, машинобудуванні,

харчовій та хімічній промисловості. Також із цієї сталі виробляють тонкостінні елементи автомобільної та мотоциклетної техніки, резервуари й ємності для хіміко-технологічного обладнання, електроди систем запалювання паливно-повітряних сумішей, компоненти газовідвідних і вихлопних систем. Високі експлуатаційні характеристики сталі зумовлюють її використання у виробництві деталей теплообмінників, контрольно-вимірювальних приладів та різноманітних промислових апаратів.

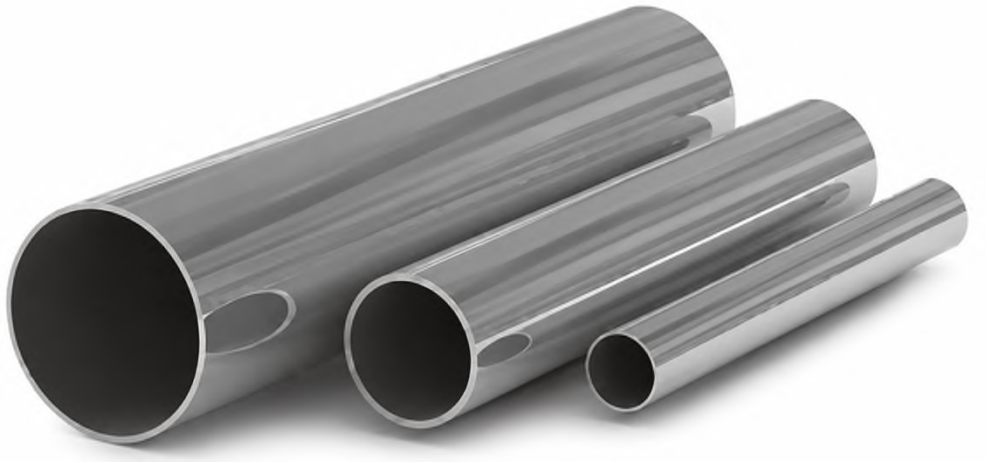


Рисунок 2.2 – Труба зі сталі AISI 304



Рисунок 2.3 – Металеві рулони зі сталі AISI 304

Таблиця 2.1 – Зарубіжні аналоги марки сталі AISI 304

Країна	Аналог
США	AISI 304, 304H, S30400
Німеччина	1.4301, 1.5301, X5CrNi18-10, X5CrNi18-9, X6CrNi18-9
Японія	SUS304
Франція	304F00, X5CrNi18-10, Z4CN19-10FF, Z5CN17-08, Z6CN18-09, Z7CN18-09
Англія	304S11, 304S15, 304S16, 304S17, 304S18, 304S25, 304S31
Євросоюз	1.4301, X5CrNi18-10, X6CrNi18-10
Італія	X3CrNi18-10, X5CrNi18-10
Іспанія	F.3504, F.3551, X5CrNi18-10
Китай	0Cr19Ni9, OCr18Ni9
Швеція	2332, 2333
Польща	0H18N9
Чехія	17240
Австрія	X5CrNi18-10OS
Україна	08Х18Н10

Експлуатаційні властивості сталі AISI 304 наступні:

1. Висока корозійна стійкість.

Сталь AISI 304 характеризується підвищеною стійкістю до впливу агресивних факторів навколишнього середовища та промислових середовищ. Вона зберігає свої властивості під дією прісної та морської води, а також більшості кислотних і лужних розчинів. Завдяки високому вмісту хрому на поверхні сталі формується захисна оксидна плівка, яка ефективно запобігає розвитку корозії. Тому вироби з AISI 304 можуть тривалий час зберігатися без створення спеціальних умов і не втрачають своїх експлуатаційних характеристик.

2. Стійкість до дії високих і низьких температур.

Таблиця 2.2 – Фізичні властивості сталі AISI 304

Властивість, од.вим.	Значення
Густина, г/см³	7,90–8,00
Температура плавлення, °C	1400–1455
Теплопровідність (20 °C), Вт/(м·К)	16,2
Питома теплоємність (20 °C), Дж/(кг·К)	500
Коефіцієнт лінійного теплового розширення (20–100 °C), $К^{-1}$	$17{,}2\times10^{-6}$
Електричний опір (20 °C), мкОм·м	0,72–0,73
Модуль пружності, ГПа	193

Таблиця 2.3 – Механічні властивості сталі AISI 304 при Т=20°С

Прокат	Розмір	$\sigma_в$, МПа	$s_{T,}$ МПа	$\delta_{5,}$ %	Ψ, %
Пруток нержавіючий	Ø 60	470	196	40	55
Лист нержавіючий	–	510	45	–	–
Лист тонкий нагартований	–	740-930	25	–	–
Лист товстий	–	510	205	43	–
Нержавіючі труби холоднодеформовані	–	529	37	–	–

Матеріал здатний надійно працювати в широкому температурному діапазоні, що дозволяє використовувати його в різних кліматичних умовах, зокрема в регіонах з екстремальними температурами. Робочий інтервал температур для сталі AISI 304 становить приблизно від –200 до +650 °C. При цьому вона зберігає механічні властивості та корозійну стійкість, а помітні структурні зміни виникають лише за тривалого нагрівання до температур близько 920 °C.

3. Низька магнітна проникність.

Завдяки аустенітній структурі сталь AISI 304 у відпаленому стані практично не проявляє магнітних властивостей. Навіть після гарячої або холодної прокатки її магнітність залишається незначною. Це зменшує налипання металевих частинок на поверхню виробів та сприяє підтриманню їх чистоти під час експлуатації.

4. Екологічна та санітарна безпечність.

Сталь AISI 304 належить до матеріалів, дозволених для контакту з харчовими продуктами. Вона не виділяє токсичних речовин і не впливає на смакові чи хімічні властивості продуктів, тому широко використовується для виготовлення харчового обладнання, кухонного інвентарю, резервуарів і трубопроводів. Завдяки цим властивостям її часто називають харчовою нержавіючою сталлю або сталлю типу Inox.

2.4 Дослідження особливостей електрошлакового переплаву сталі AISI 304 при застосуванні різних флюсів

2.4.1 Матеріали та методика дослідження

Плавку проводили у водоохолоджуваному кристалізаторі на лабораторній установці електрошлакового переплаву УШ-114 (рис. 2.4), що складається з печі, пульта керування, щитка та джерело живлення. Джерелом живлення установки слугував зварювальний трансформатор змінного струму з падаючою зовнішньою характеристикою потужністю 90 кВА, що забезпечував робочі параметри 60 В і 1500 А. Для дослідження було обрано декілька типів флюсів (зокрема АНФ-1, АНФ-7 (рис. 2.5), АНФ-28 та експериментальний флюс умовного позначення 3/3/3), які відрізнялися хімічним складом (табл. 2.4) та фізико-хімічними властивостями, що дало можливість оцінити їх вплив на кінетику переплаву, ефективність рафінування металу та формування структури зливків.

Таблиця 2.4 – Усереднений хімічний склад флюсів, що використовували в експериментах

Марка флюсу	Хімічний склад, мас. %				
	CaF_2	CaO	Al_2O_3	SiO_2	MgO
АНФ-1	93	5	–	2	–
АНФ-7	73	25	–	2	–
АНФ-28	30	10	20	35	5
експериментальний (3/3/3)	33	33	30	3	1

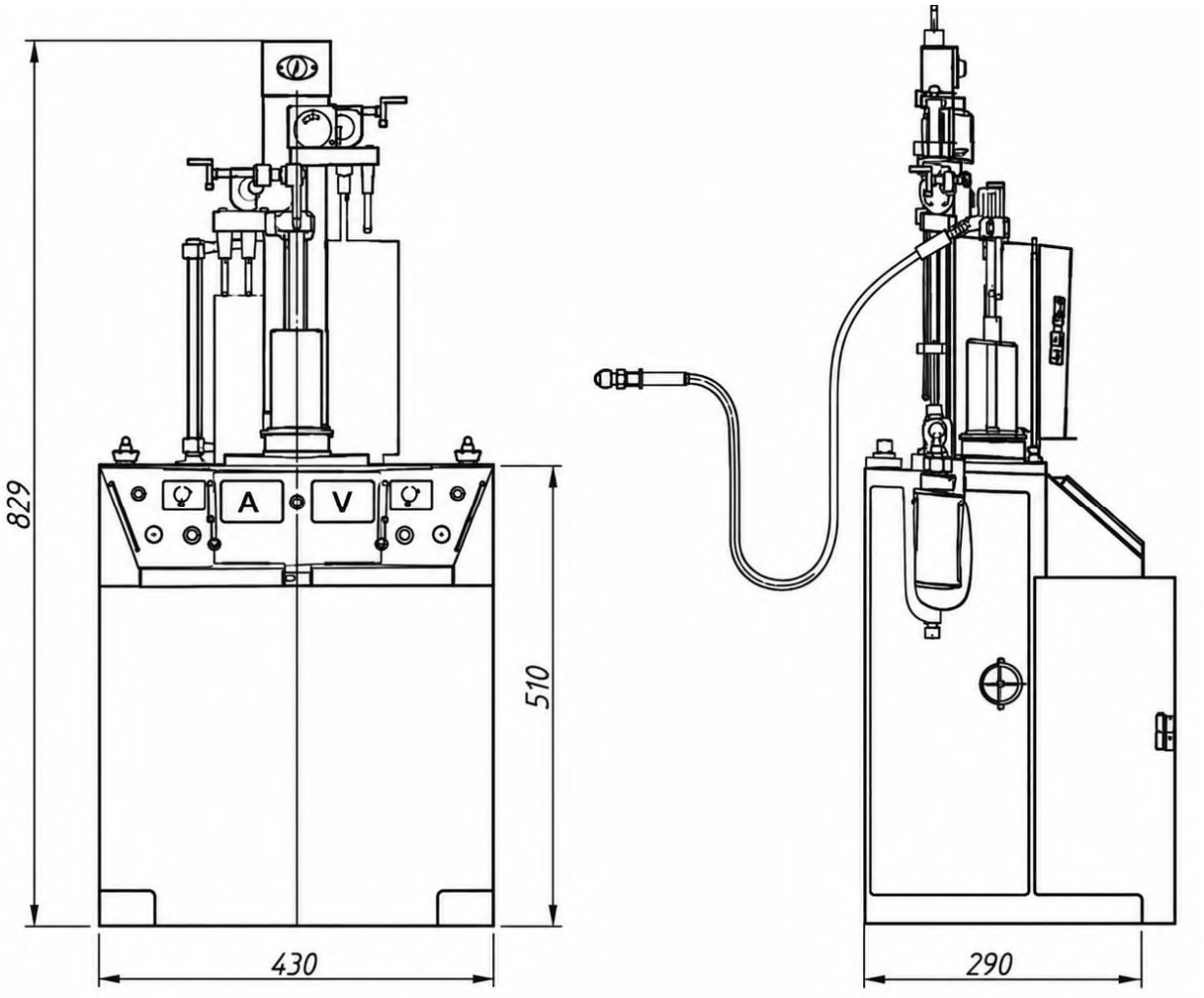


Рисунок 2.4 – Схема установки УШ-114

Так флюс АНФ-1 є високо-фторидним і характеризується високою рафінувальною здатністю; АНФ-7 належить до фторидно-вапнякових

флюсів з підвищеною основністю; АНФ-28 є оксидно-фторидним флюсом, що забезпечує стабільний перебіг процесу переплаву та формування якісного металу.

Вибрані шлакові системи забезпечили репрезентативні умови для вивчення особливостей електрошлакового переплаву сталі AISI 304.



Рисунок 2.5 – Флюс АНФ-7

Маса флюсу для кожної плавки становила 250 г. Така кількість була визначена необхідністю формування шлакової ванни висотою близько 40 мм, що забезпечувало достатній електричний опір для стабільного перебігу процесу ЕШП. Хімічний склад металу, вихідних флюсів і отриманих шлаків визначали за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізатора «XRF Express Analyzer INAM Expert 4L» (рис. 2.6). Дослідження неметалевих включень виконували з використанням оптичного мікроскопа «Carl Zeiss» (рис. 2.7) та скануючого електронного мікроскопа «SEM TESCAN VEGA 3» (рис. 2.8).



Рисунок 2.6 – Лабораторний прецизійний рентгенофлуоресцентний експрес-аналізатор складу речовини «INAM Expert 4L»



Рисунок 2.7 – Мікроскоп «Carl Zeiss»

Оцінювання забрудненості металу неметалевими включеннями виконували відповідно до вимог ДСТУ ISO 4967:2017 «Сталь. Визначення вмісту неметалевих включень. Металографічний метод оцінювання за стандартними шкалами (ISO 4967:2013, IDT)» методом мікроскопічного аналізу. Оцінювання розмірів неметалевих включень проводили уздовж горизонтальних і вертикальних ліній металографічних шліфів. Визначення розмірів неметалевих включень та розрахунок індексу забрудненості литих металів виконували методом лінійного підрахунку на нетравлених шліфах.



Рисунок 2.8 – Скануючий електронний мікроскоп «SEM TESCAN VEGA 3»

У роботі використовувалися методи статистичного та порівняльного аналізу отриманих результатів, що дозволило оцінити вплив різних флюсів на продуктивність процесу електрошлакового переплаву, зміну хімічного складу металу та рівень його забрудненості неметалевими включеннями.

Порівняльний аналіз проводили шляхом зіставлення показників вихідного металу та зливків, отриманих після переплаву під різними флюсами. Статистичне опрацювання експериментальних даних забезпечило підвищення достовірності результатів досліджень, виявлення закономірностей впливу складу флюсу на якість металу та визначення найбільш ефективного варіанта флюсу для переплаву неіржавіючої сталі AISI 304. Отримані результати були представлені у вигляді таблиць та мікроструктурних зображень, що дозволило комплексно оцінити ефективність досліджуваних технологічних режимів.

2.4.2 Встановлення впливу складу флюсів на режим переплаву та хімічний склад зливків нержавіючої сталі AISI 304, отриманих способом електрошлакового переплаву

У результаті виконаних експериментальних досліджень було одержано чотири зливки (рис. 2.9). Якість їхньої поверхні відрізнялася залежно від використаного флюсу, що пов’язано з різними фізико-хімічними властивостями шлакових систем.

У всіх дослідах переплав витратного електрода проводили за умов стабільного електричного режиму. Водночас кожен із застосованих флюсів характеризувався власними електрофізичними параметрами, насамперед різним питомим електричним опором у рідкому стані, що суттєво впливало на теплові умови процесу та швидкість переплаву. Величина електричного опору шлакової ванни визначає інтенсивність виділення теплоти під час проходження електричного струму, а отже, впливає на температурний режим плавлення електрода, формування рідкої металевої ванни та подальшу кристалізацію зливка.

З урахуванням зазначених параметрів було визначено продуктивність процесу електрошлакового переплаву для кожного з досліджуваних флюсів. Розрахунки виконували на основі експериментально встановлених значень

тривалості повного переплаву витратного електрода, маси отриманого зливка та сталих електричних параметрів процесу (сили струму і напруги). Отримані значення продуктивності становили: для флюсу АНФ-1 – 14,8 кг/год, АНФ-7 – 17,3 кг/год, АНФ-28 – 16,1 кг/год, а для флюсу складу 3/3/3 – 27,3 кг/год.



а б в г

а – АНФ-1; б – АНФ-7; в – АНФ-28; г – експериментальний (3/3/3)

Рисунок 2.9 – Зливки, отримані в результаті плавок під різними флюсами

Результати досліджень свідчать про суттєвий вплив складу флюсу на швидкість перебігу процесу переплаву. Найвищу продуктивність забезпечив експериментальний флюс 3/3/3, тоді як для флюсу АНФ-1 було зафіксовано найменше значення цього показника. Така закономірність пояснюється відмінностями у фізико-хімічних властивостях шлакових розплавів, насамперед їх електричному опорі. Флюси з підвищеним електричним опором сприяють інтенсивнішому виділенню теплоти в шлаковій ванні, що забезпечує більш високу температуру процесу та прискорює плавлення

витратного електрода. Натомість використання флюсів із нижчим електричним опором супроводжується зменшенням швидкості переплаву та, відповідно, продуктивності процесу.

Таким чином, проведені розрахунки дозволили кількісно оцінити вплив властивостей різних флюсів на ефективність електрошлакового переплаву та створили основу для подальшого обґрунтування вибору оптимального складу шлаку залежно від вимог до технологічного процесу та якості металу.

Для оцінювання змін, що відбуваються у складі флюсів під час електрошлакового переплаву, після завершення кожного експерименту було виконано аналіз хімічного складу шлакових залишків. Результати досліджень наведено в табл. 2.5. Аналіз проводили за допомогою рентгенофлуоресцентного спектрального методу, який забезпечує визначення елементного складу матеріалу у формі відповідних оксидів.

Таблиця 2.5 – Хімічний склад шлаків після ШШП

Марка флюсу	Хімічний склад, мас. %						
	CaF_2+CaO	Al_2O_3	SiO_2	MgO	MnO	Cr_2O_3	Fe_2O_3
АНФ-1	89,93	–	3,54	0,89	2,38	1,89	1,37
АНФ-7	87,61	–	2,36	0,90	0,98	1,46	0,59
АНФ-28	66,01	18,66	8,46	2,58	2,20	1,78	0,31
експеримен-тальний (3/3/3)	64,70	26,07	3,20	1,06	1,86	2,37	0,74

Слід враховувати, що даний метод не дає можливості безпосередньо визначати вміст фторидів, зокрема фториду кальцію (CaF_2), який є одним із основних компонентів досліджуваних флюсів. У зв’язку з цим у таблиці вміст оксиду кальцію наведено як сумарний показник CaO + CaF_2**,** що характеризує загальну концентрацію кальцієвмісних сполук у шлаковій фазі

та використовується виключно для порівняльної оцінки змін складу флюсу в процесі переплаву.

Аналіз отриманих даних дозволяє оцінити ступінь участі окремих компонентів шлаку у шлакометалевій взаємодії, а також простежити тенденції зміни складу шлакової ванни залежно від умов переплаву. Про вплив шлаку на хімічний склад металу можна судити за наявністю та концентрацією оксидів металів, зокрема MnO, Cr_2O_3 та Fe_2O_3, які утворюються внаслідок окиснювально-відновних процесів під час ЕШП і накопичуються у шлаковій фазі.

Такий підхід дає можливість виконати коректний порівняльний аналіз результатів з урахуванням обмежень застосованого методу дослідження, а також відстежити закономірності зміни складу шлакової фази залежно від умов переплаву та інтенсивності шлакометалевої взаємодії.

Вплив шлаку на зміну хімічного складу металу можна оцінити за вмістом оксидів металів, зокрема MnO, Cr_2O_3 та Fe_2O_3, які утворюються у шлаковій фазі після завершення переплаву. Сумарний вміст зазначених оксидів для різних флюсів становив: для АНФ-1 – 5,64 %, АНФ-7 – 3,03 %, АНФ-28 – 4,29 %, а для експериментального флюсу 3/3/3 – 4,97 %. Отримані результати свідчать, що найменший ступінь окиснення металевих компонентів під час переплаву досліджуваної сталі забезпечував флюс АНФ-7, що вказує на його найбільш сприятливі рафінувальні властивості серед досліджених складів.

Результати визначення хімічного складу металу після електрошлакового переплаву наведено в табл. 2.6. Аналіз виконували методом рентгенофлуоресцентної спектроскопії, який дозволяє з високою точністю визначати концентрацію основних легувальних та супутніх елементів у металі. Водночас особливості методу не дають змоги достовірно визначати вміст деяких елементів, присутніх у вигляді легколетких або неметалевих сполук, зокрема вуглецю, сірки та фосфору.

Оскільки вміст C, S і P у сталі марки AISI 304 є невеликим (див. рис.

2.1) та регламентується відповідними стандартами, відсутність інформації щодо їх концентрацій не знижує достовірності отриманих результатів і не впливає на оцінку ефективності процесу електрошлакового рафінування. Крім того, відомо, що процес ЕШП практично не призводить до зміни вмісту вуглецю в металі, тому отримані дані можна вважати достатніми для аналізу змін концентрації основних легувальних елементів та оцінювання впливу різних флюсів на якість металу.

Аналіз результатів показав, що хімічний склад усіх отриманих після ЕШП зливків відповідає вимогам до аустенітної корозійностійкої нержавіючої сталі марки AISI 304 (EN 1.4301), регламентованим стандартами AISI Type 304 Austenitic Stainless Steel та EN 10088 «Stainless steels». Серед супутніх елементів найбільш помітні зміни спостерігалися для кремнію та марганцю. Найбільший вплив на їх концентрацію мав флюс АНФ-1, що свідчить про його підвищену хімічну активність та більш інтенсивну взаємодію з компонентами металевої ванни під час переплаву. Це вказує на значний вплив складу флюсу на перебіг шлакометалевих реакцій та ефективність процесу рафінування металу.

Наявність високої реакційної здатності флюсу АНФ-1 підтверджується підвищеним вмістом оксидів металів у шлаковій фазі після переплаву. Зокрема, сумарна частка оксидів MnO, Cr_2O_3 та Fe_2O_3 для цього флюсу становила 5,64 %, що є найбільшим показником серед усіх досліджених варіантів.

Для дослідження розмірів неметалевих включень використовували зразки, відібрані з центральної частини зливків (рис. 2.10). Дослідження проводили в центральній, середній та зовнішній частинах зливка – відповідно ліва, центральна та права колонки

Розрахунок індексу забрудненості неметалевими включеннями показав, що найнижче значення цього показника було характерне для зразка, переплавленого під флюсом АНФ-7, що свідчить про високу металургійну чистоту та мінімальну кількість великих включень.

Таблиця 2.6 – Загальний індекс забрудненості металу дослідних зразків

Марка флюсу	Вт	Во	Ст	Со	Dт	Do	DS	DG	Загальний індекс забрудненості
АНФ-1	0,0032	0,0020	0,0020	0,0019	0,0004	0	0	0	0,0095
АНФ-7	0,0032	0,0005	0,0009	0,0030	0,0004	0	0	0	0,0080
АНФ-28	0,0059	0,0017	0,0016	0,0007	0,0008	0	0	0	0,0100
Експериментальний (3/3/3)	0,0085	0,0029	0,0018	0,0011	0,0009	0	0	0	0,0150
Вихідний зразок	0,0100	0,0037	0,0020	0,0016	0	0,0009	0	0,0009	0,0191

Примітка: Позначення включень наведені відповідно до класифікації ДСТУ ISO 4967:2017 «Сталь. Визначення вмісту неметалевих включень. Металографічний метод оцінювання за стандартними шкалами (ISO 4967:2013, IDT)»: Вт, Во – оксидні включення; Ст, Со – силікатні включення; Dт, Do, DS, DG – глобулярні включення різних типів. Загальний індекс забрудненості визначено як суму індексів окремих видів неметалевих включень.

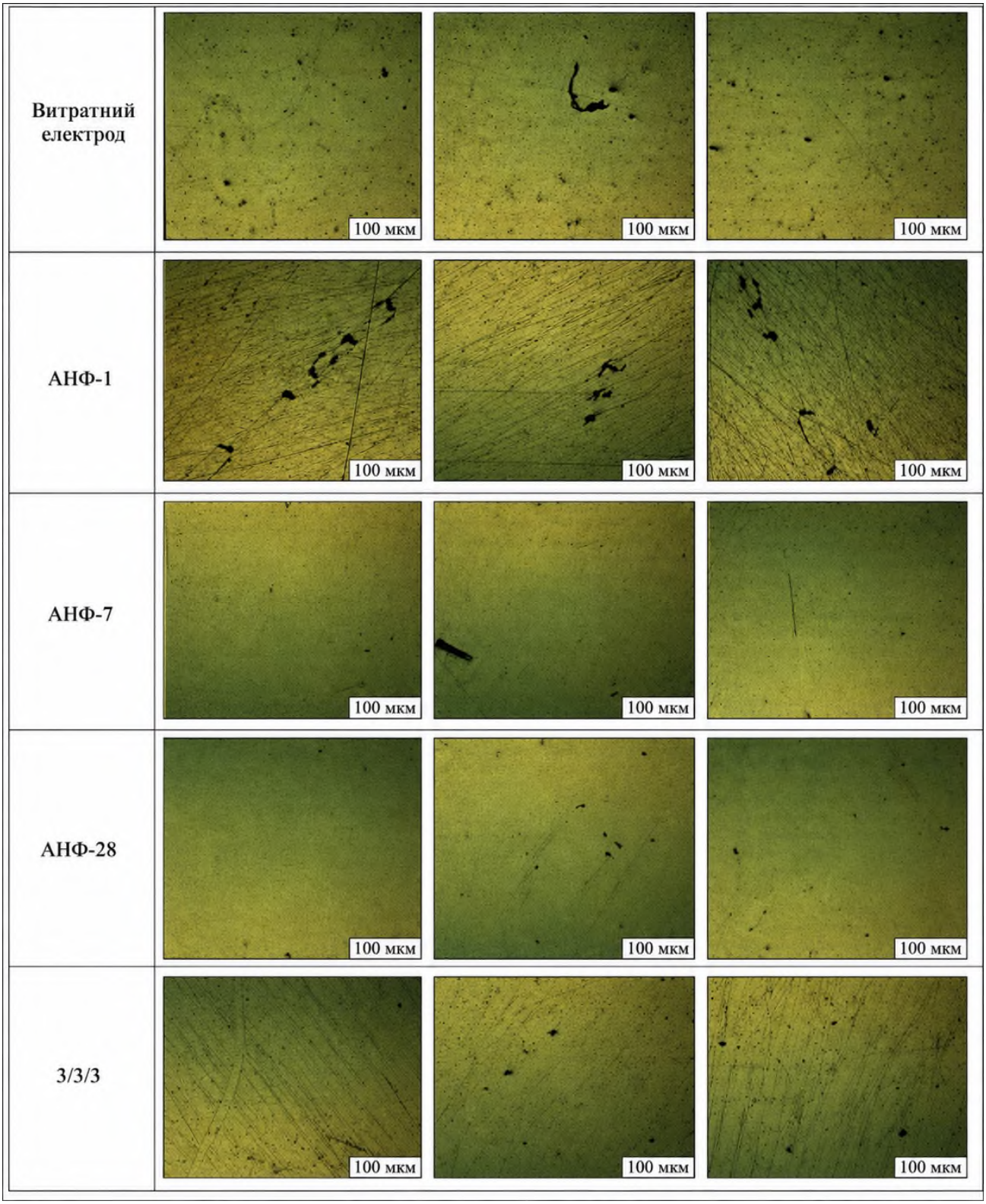


Рисунок 2.10 – Неметалеві включення в металі витратного електрода і зливків, виплавлених під різними флюсами

Водночас найбільший індекс забрудненості зафіксовано у вихідному металі до переплаву, де були виявлені включення розміром до 140 мкм, які

можуть негативно впливати на експлуатаційні властивості сталі.

Наступним етапом роботи стало дослідження мікроструктури металу за допомогою сканувальної електронної мікроскопії (рис. 2.11). Аналіз отриманих мікроструктур показав, що в усіх зонах зливків сформувалася досить однорідна дрібнозерниста структура. Центральна та проміжна частини зразків характеризувалися подібною морфологією, а неметалеві включення були рівномірно розподілені по об’єму металу. Для металу, переплавленого під флюсами АНФ-1 та АНФ-7, характерною була дрібнозерниста структура з однорідним розподілом фаз і відсутністю макропористості.

Найнижчу якість мав вихідний метал до проведення ЕШП. Для нього були характерні значна кількість неметалевих включень, наявність мікротріщин, грубозерниста структура та найвище значення індексу забрудненості.

Отримані результати підтвердили високу ефективність електрошлакового переплаву як способу рафінування нержавіючих сталей, зокрема сталі AISI 304. Застосування ЕШП сприяло підвищенню металургійної чистоти металу, зменшенню кількості неметалевих включень, покращенню макро- та мікроструктури зливків, а також більш рівномірному розподілу легувальних елементів по їх перерізу. Крім того, процес забезпечив стабілізацію хімічного складу металу та зменшення впливу шкідливих домішок, які можуть погіршувати корозійну стійкість і механічні властивості сталі.

Порівняння ефективності досліджених флюсів показало, що найкращі результати було отримано при використанні флюсу АНФ-7. Саме цей флюс забезпечив оптимальне поєднання продуктивності переплаву, високої рафінувальної здатності шлаку, стабільності електричних параметрів процесу та ефективного видалення неметалевих включень. Крім того, для металу, переплавленого під АНФ-7, були характерні найкращі показники структурної однорідності.

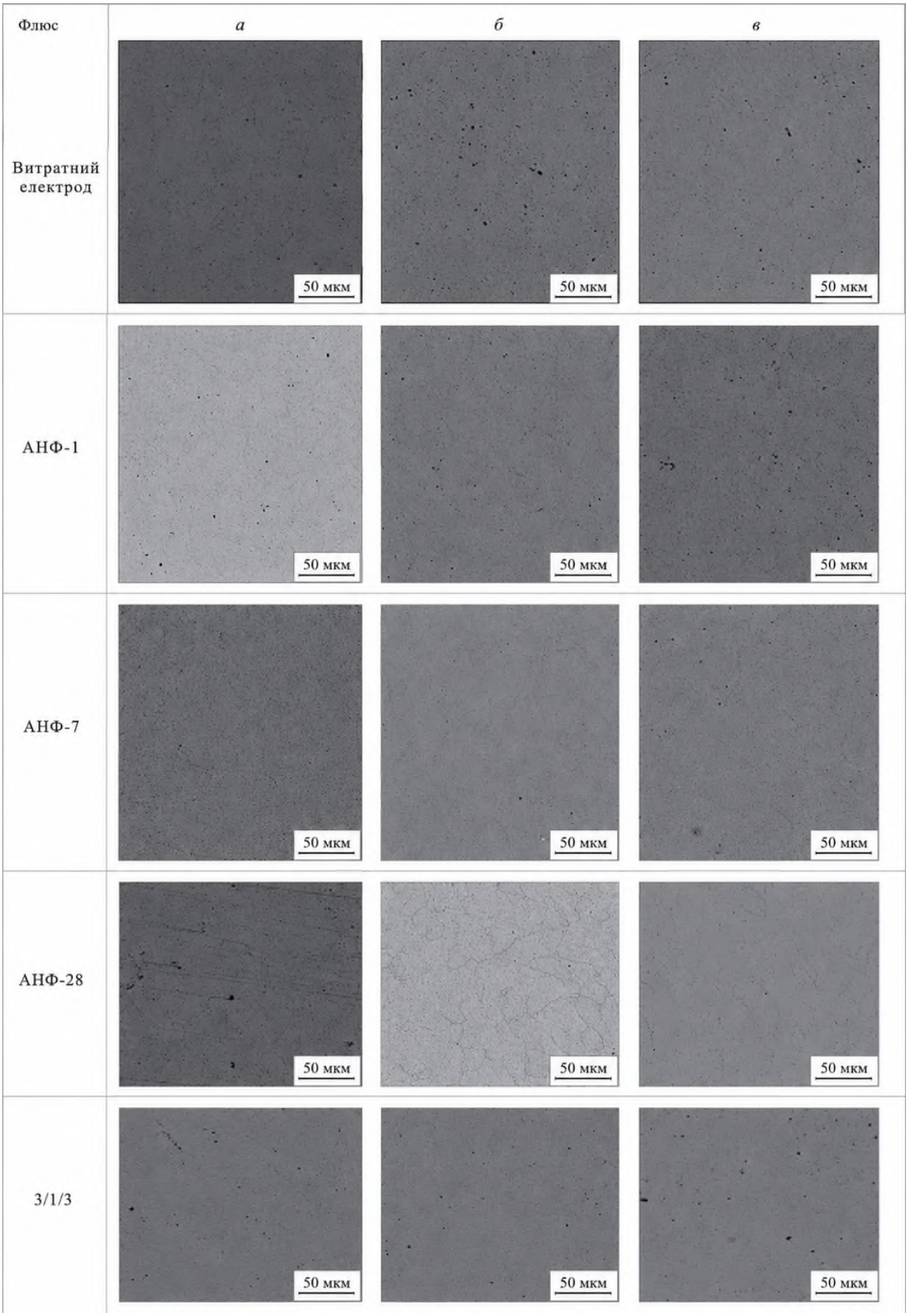


Рисунок 2.11 – Мікроструктура досліджуємих зразків

З огляду на результати проведених досліджень, флюс АНФ-7 можна рекомендувати як найбільш доцільний для електрошлакового переплаву сталей типу AISI 304. Його застосування дозволяє підвищити якість готової металопродукції, зменшити втрати легувальних елементів та забезпечити стабільне протікання технологічного процесу електрошлакового переплаву.

2.5 Розрахунок в'язкості флюсів для електрошлакового переплаву методом рівних сум

У флюсах, що застосовуються для електрошлакового переплаву, однією з ключових технологічних характеристик є в’язкість. Вона визначає інтенсивність перебігу фізико-хімічних процесів у шлаковій ванні, впливає на рафінуючу здатність шлаку, його електропровідність, а також на формування структури металу під час кристалізації.

Через високі температури електрошлакового процесу експериментальне визначення в’язкості є ускладненим, тому широко застосовуються розрахункові методи її визначення. Залежність в’язкості від температури має експоненційний характер і описується відповідними аналітичними рівняннями.

Використання методу рівних сум дозволяє спростити визначення коефіцієнтів рівняння залежності в’язкості від температури без застосування складних обчислень методу найменших квадратів.

Рівняння залежності в’язкості флюсів від температури виражається у вигляді експоненціального закону:

$$\eta = A \cdot e^{-E\eta/RT}, \qquad (2.1)$$

де: η – в’язкість розплавленого флюсу, Па·с;

A – константа, що залежить від природи розплавленого флюсу;

$E\eta$ – енергія активації в’язкої течії, Дж/моль;

R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К);

T – температура, К.

Після логарифмування рівняння (2.1) отримуємо:

$$\lg\eta=\lg A-(E\eta/2.303RT) \quad (2.2)$$

З урахуванням значення lge=0,43429, рівняння набуває вигляду:

$$\lg\eta=\lg A-0{,}43429E\eta/RT \quad (2.3)$$

Після відповідних перетворень отримаємо лінійну залежність:

$$\lg\eta=a+b\cdot T \quad (2.4)$$

де a і b – емпіричні коефіцієнти.

Рівняння (2.4) аналогічне рівнянню прямої виду:

$$y=a+b\cdot x$$

Для ряду флюсів, що застосовуються при електрошлаковому переплаві, залежність в’язкості від температури має лінійний характер.

Як приклад розглянемо флюс складу: 20 % CaF_2 + 10 % Al_2O_3 + 5 % CaO + 35 % SiO_2 + 25 % MnO + 5 % MgO.

Його температурна залежність в’язкості, отримана експериментально, близька до прямої.

Для практичних розрахунків у рівнянні (2.4) визначаються коефіцієнти *a* і *b* методом найменших квадратів.

Для визначення коефіцієнтів використовується система рівнянь (метод найменших квадратів):

$$\sum x_k y_k = a \sum x_k + b \sum x_k^2$$
$$\sum y_k = an + b \sum x_k \quad (2.5)$$

У загальному випадку система має вигляд:

$$\begin{cases} \sum y_k = an + b \sum x_k \\ \sum x_k y_k = a \sum x_k + b \sum x_k^2 \end{cases} \quad (2.6)$$

Для спрощення застосовується метод рівних сум, який полягає у використанні першого рівняння системи кілька разів для різних інтервалів значень температури:

$$\sum_{k=1}^{n/2} y_k = a\frac{n}{2} + b\sum_{k=1}^{n/2} x_k$$
$$\sum_{k=n/2}^{n} y_k = a\frac{n}{2} + b\sum_{k=n/2}^{n} x_k \quad (2.7)$$

Після підстановки меж інтервалів отримуємо систему:

$$\begin{cases} a \cdot \frac{n}{2} + b\sum_1^{n/2} x_k = \sum_1^{n/2} y_k \\ a \cdot \frac{n}{2} + b\sum_{n/2}^{n} x_k = \sum_{n/2}^{n} y_k \end{cases} \quad (2.8)$$

Температурний інтервал 1350–1525 °C розбивається на 8 частин з кроком 25 °C. Для кожного значення температури визначаються значення в’язкості та обчислюється $lg\eta$.

На основі розрахунків отримано систему рівнянь:

$$\begin{cases} 4a + 2{,}271b = -4{,}718 \\ 4a + 2{,}409b = -3{,}941 \end{cases} \quad (2.9)$$

Розв’язання системи дає: a = –4,400; b = 5,671.

Отже, рівняння температурної залежності в’язкості має вигляд:

$$\lg\eta = -4{,}400 + 5{,}671 \cdot 10^{-3} T \qquad (2.10)$$

Для знаходження меж температур від 1350 до 1525 °С з інтервалом 25 °С розбиваємо діапазон на 8 частин (рис. 2.12). На осі ординат визначаємо значення в’язкості, що відповідають кожній температурі. Отримані дані заносимо до табл. 2.7. Для першого рівняння межі приймаємо від 1 до 4, для другого – від 5 до 8.

Таблиця 2.7 – В’язкість флюсу (20% CaF_2 + 10% Al_2O_3 + …)

k	t, °C	T, K	x = $1/T \cdot 10^3$	η (експимен-тальні)	lgη (експимен-тальні)	lgη (розрахун-кові)
1	1525	1798	0.556	0.057	-1.244	-1.246
2	1500	1773	0.564	0.063	-1.200	-1.202
3	1475	1748	0.572	0.069	-1.161	-1.156
4	1450	1723	0.580	0.077	-1.113	-1.113
5	1425	1698	0.589	0.0869	-1.060	-1.060
6	1400	1673	0.597	0.0976	-1.010	-1.010
7	1375	1648	0.607	0.1095	-0.960	-0.959

Для кожного рівняння встановлюємо власні межі. Для цього використовуємо рис. 2.12. З нього вибираємо десять значень температури в діапазоні від 1350 до 1575 °С з інтервалом 25 °С. Кожному значенню температури на осі абсцис відповідає відповідне значення в’язкості. Отримані дані заносимо до табл. 2.8.

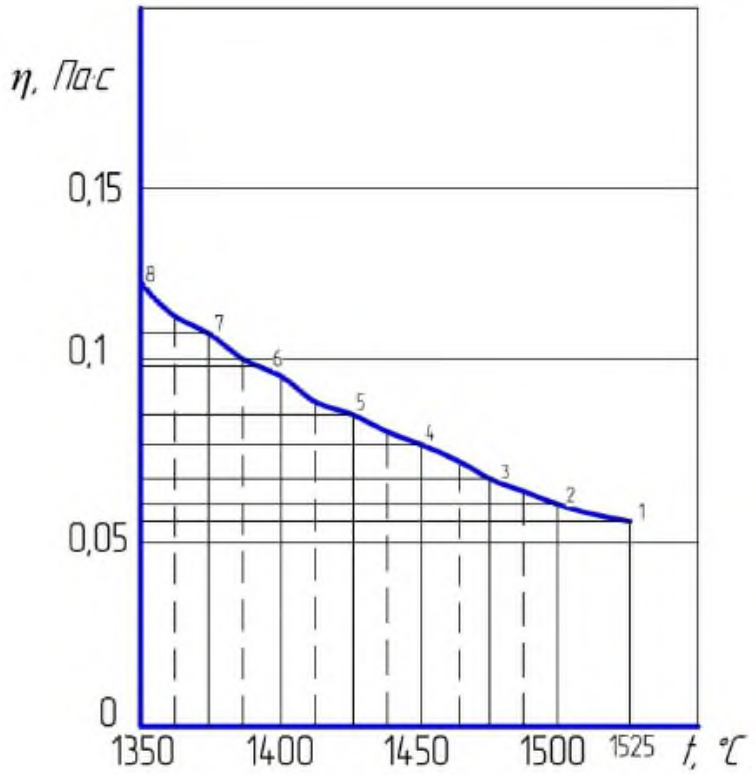


Рисунок 2.12 – Температурна залежність в’язкості флюсу складу 20 % CaF_2 + 10 % Al_2O_3 + 5 % CaO + 35 % SiO_2 + 25 % MnO + 5 % MgO

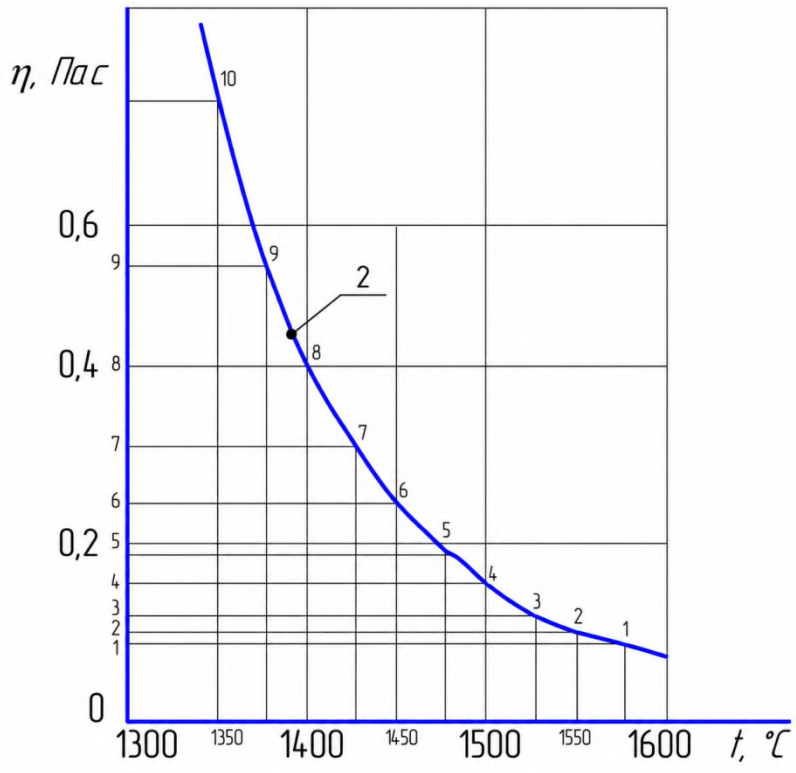


Рисунок 2.13 – Температурна залежність в’язкості флюсу складу 65 % CaF_2 + 30 % Al_2O_3 + 5 % CaO

Оскільки обрано три рівняння, десять значень температури необхідно розподілити на три частини з різними межами. Для першого рівняння межі приймаємо від 1 до 4, для другого – від 5 до 7, для третього – від 8 до 10.

З табл. 2.8 видно, що різниця у значеннях в'язкості, визначена різними способами, становить ±1,5 %.

Отже, способом рівних сум запропоновано аналітичний метод розрахунку в'язкості η залежно від температури T розплавлених флюсів для електрошлакового переплаву металів. Встановлено, що розбіжність між значеннями в'язкості, отриманими за запропонованим методом, та експериментальними даними не перевищує ±1,5 %. Запропонований спосіб розрахунку дає змогу прогнозувати в'язкість розплавлених флюсів у широкому діапазоні температур без проведення експериментальних досліджень.

Таблиця 2.8 – Залежність в'язкості від температури флюсу складу 65% CaF_2 + 30% Al_2O_3 + 5% CaO

k	t, °C	T, K	x	x^2	lgη експери-ментальні	lgη розрахункові
1	1575	1848	0.541	0.293	-1.086	-1.088
2	1550	1823	0.548	0.300	-1.000	-1.002
3	1525	1798	0.556	0.309	-0.910	-0.905
4	1500	1773	0.564	0.318	-0.812	-0.808
5	1475	1748	0.572	0.327	-0.719	-0.710
6	1450	1723	0.580	0.336	-0.602	-0.607
7	1425	1698	0.589	0.347	-0.503	-0.503
8	1400	1673	0.598	0.357	-0.394	-0.394
9	1375	1648	0.607	0.368	-0.289	0.285
10	1350	1623	0.616	0.379	-0.175	0.176

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

3.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів в процесі ЕШП

Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при роботі біля установки ЕШП передбачає комплексну оцінку фізичних, хімічних та енергетичних впливів виробничого середовища, що виникають у процесі електрошлакового переплаву.

Аналіз шкідливих факторів виробничого середовища, наведених у табл. 3.1, дає змогу сформулювати наступні висновки щодо умов праці сталевара:

– оцінка технічного та організаційного рівня виробництва відповідає вимогам технологічного регламенту та проєкту організації праці на робочому місці;

– за результатами атестації робочого місця встановлено наявність 4 факторів 1-го ступеня шкідливості та 7 факторів 3-го ступеня;

– умови праці в електросталеплавильному цеху характеризуються як важкі: віднесені до II класу шкідливості – 2 фактори, та до III класу – 3 фактори.

У зв’язку з наявністю значної кількості шкідливих виробничих факторів доцільно детальніше розглянути основні фізичні фактори виробничого середовища, до яких належать шум, вібрація, підвищена запиленість повітря, несприятливий мікроклімат (підвищена температура та теплове випромінювання), а також електромагнітні поля, що в сукупності суттєво впливають на стан здоров’я працівників.

Одним із основних фізичних факторів є шум, який відповідно до санітарних норм (ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку») для 8-годинної робочої зміни не повинен перевищувати 80 дБА, однак у реальних умовах біля трансформаторів,

систем охолодження та кранового обладнання рівень шуму може досягати 85–100 дБА, що перевищує допустимі значення та потребує використання засобів захисту органів слуху.

Таблиця 3.1 – Оцінка факторів виробничого та трудового процесу професія: сталевар, робоче місце – установка ЕШП

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

Також суттєвим небезпечним фактором є теплове випромінювання від зони розплаву, яке має переважно інфрачервоний характер, супроводжується інтенсивним видимим світловим випромінюванням

високої яскравості, а в окремих випадках – незначною часткою ультрафіолетового випромінювання. Температура металу та шлаку в зоні електрошлакового переплаву зазвичай становить приблизно 1600–2000 °C, що обумовлює дуже високий тепловий потік у робочу зону. Це може спричиняти перегрів організму, тепловий удар, опіки шкіри різного ступеня та ураження органів зору (зокрема фотокератит і «спалахове» ураження сітківки) при недостатньому використанні засобів індивідуального захисту.

Відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», НПАОП 0.00-1.80-18 «Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання», а також ДСТУ EN 12198-1:2018 «Безпечність машин. Оцінювання та зниження ризиків, що виникають від випромінення, випромінюваного машиною. Частина 1. Загальні принципи (EN 12198-1:2000 + A1:2008, IDT)», на виробничих дільницях повинні бути передбачені заходи щодо захисту працівників від дії теплового та світлового випромінювання.

У процесі електрошлакового переплаву в повітря робочої зони можуть виділятися шкідливі гази та аерозолі, зокрема оксид вуглецю (CO), діоксид вуглецю (CO_2), оксиди азоту (NO_x), а також фторовмісні сполуки (HF, SiF_4), особливо при використанні флюсів на основі CaF_2. Крім того, утворюються дрібнодисперсні аерозолі оксидів металів (MnO, Cr_2O_3, FeO), які можуть негативно впливати на органи дихання та загальний стан здоров’я персоналу при тривалому впливі.

Відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» на виробничих дільницях повинні бути забезпечені заходи щодо контролю та зниження концентрацій шкідливих речовин у повітрі робочої зони.

Ще одним фактором є вплив електромагнітного поля промислової частоти (50 Гц), яке створюється потужним електрообладнанням установки ЕШП, зокрема трансформаторами, силовими кабелями та

електродотримачами. Напруженість електромагнітного поля залежить від режиму роботи установки та відстані до джерела випромінювання і може досягати підвищених значень у безпосередній близькості до обладнання. Тривале перебування в зоні його дії може спричиняти функціональні зміни в організмі працівника, зокрема підвищену втому, головний біль, зниження концентрації уваги, а також несприятливий вплив на нервову та серцево-судинну системи при тривалому впливі без належного захисту та регламентованих перерв.

Відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», ДСанПіН 3.3.6.096-2002 «Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів» на виробничих об’єктах повинні бути передбачені заходи щодо обмеження впливу електромагнітних полів на працівників.

Таким чином, сукупна дія шкідливих і небезпечних факторів при роботі з установкою ЕШП формує підвищений рівень професійного ризику для персоналу. Найбільш критичними серед них є шум, теплове випромінювання та пилогазові викиди, які мають комбінований характер впливу. Це вимагає суворого дотримання технологічної дисципліни та регламентів безпеки під час виконання виробничих операцій. Для зниження негативного впливу необхідно застосовувати комплекс організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів захисту.

3.2 Заходи щодо зниження та усунення впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів в процесі ЕШП

З метою захисту від теплового випромінювання та високих температур слід застосовувати теплоізоляційні екрани, дистанційне керування процесом, а також спеціальний термостійкий одяг, рукавиці та захисні щитки для обличчя і очей (рис. 3.1). Додатково важливо організовувати раціональний режим праці та відпочинку для запобігання перегріву організму.



Рисунок 3.1 – Спеціальний термостійкий одяг, рукавиці та захисні щитки для обличчя і очей при роботі з установкою ЕШП

Для зниження впливу шкідливих газів і аерозолів необхідно передбачити ефективні системи загальнообмінної та місцевої витяжної вентиляції, а також аспіраційні установки безпосередньо в зоні утворення випарів. Обов’язковим є контроль концентрацій шкідливих речовин у повітрі робочої зони та використання засобів індивідуального захисту органів дихання (респіраторів або фільтрувальних масок (рис. 3.2)).

Для мінімізації ризику ураження електричним струмом слід забезпечити справний стан електрообладнання, якісну ізоляцію кабелів, заземлення металевих конструкцій та впровадження систем блокування і сигналізації. Обслуговування установки дозволяється лише після повного знеструмлення або в умовах суворо регламентованих процедур.

Зменшення впливу шуму та вібрації досягається шляхом застосування шумопоглинаючих кожухів на обладнанні, використання сучасних

малошумних механізмів, а також застосування індивідуальних засобів захисту органів слуху (навушників або берушів (рис. 3.3)).



Рисунок 3.2 – Засоби індивідуального захисту органів дихання та зору при роботі в умовах забрудненого повітря (пил, гази, аерозолі)



Рисунок 3.3 – Засоби індивідуального захисту органів слуху

Для зниження впливу електромагнітного поля промислової частоти передбачається раціональне розміщення обладнання, екранування силових кабелів і трансформаторів, а також обмеження часу перебування персоналу в зоні підвищеного електромагнітного впливу.

Таким чином, реалізація комплексу зазначених заходів дозволяє суттєво знизити рівень професійних ризиків та забезпечити безпечні умови праці при експлуатації установки ЕШП.

3.3 Заходи з пожежної та техногенної безпеки в процесі ЕШП

У процесі електрошлакового переплаву існує підвищений рівень пожежної та техногенної небезпеки, що пов’язано з використанням високих температур, електричних струмів великої сили та розплавленого металу і шлаку. Основними потенційними небезпеками є короткі замикання, перегрів електрообладнання, загоряння ізоляційних матеріалів, а також можливі аварійні викиди розплаву.

Згідно з вимогами НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні», Закону України «Про пожежну безпеку», а також НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (рос)), на виробничих об’єктах повинні бути впроваджені організаційні та технічні заходи щодо запобігання аваріям і пожежам.

До основних заходів запобігання аваріям і пожежам належать:

– забезпечення справного стану електрообладнання та регулярний контроль ізоляції кабелів відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.21-98;

– застосування ефективних систем заземлення та захисного відключення згідно з ПУЕ «Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання)»;

– недопущення перевантаження електричних кіл і контроль робочих

параметрів установки;

– використання негорючих та термостійких матеріалів у зоні плавлення відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014;

– своєчасне технічне обслуговування трансформаторів, кабельних ліній та контактних з'єднань;

– оснащення виробничих приміщень первинними засобами пожежогасіння згідно з ДСТУ EN 3-7:2004 «Вогнегасники переносні. Частина 7. Характеристики, вимоги до робочих показників та методи випробування (EN 3-7:2004 + A1:2007, IDT)» та правилами пожежної безпеки;

– організація вільного доступу до аварійних вимикачів та систем швидкого відключення живлення;

– проведення інструктажів і навчання персоналу відповідно до НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці»;

– контроль температурних режимів процесу для запобігання перегріву обладнання;

– забезпечення ефективної вентиляції та видалення газів із робочої зони згідно з вимогами санітарних норм.

Дотримання зазначених нормативних документів і технічних заходів дозволяє мінімізувати ризики виникнення пожеж і техногенних аварій, а також забезпечує безпечну та стабільну роботу установки ЕШП.

Окрім пожежної безпеки, у процесі електрошлакового переплаву особливу увагу необхідно приділяти забезпеченню техногенної безпеки, оскільки технологія пов'язана з експлуатацією складного електротехнічного та теплотехнічного обладнання, а також з високою ймовірністю виникнення аварійних ситуацій технологічного характеру.

Відповідно до вимог Закону України «Про об'єкти підвищеної небезпеки», Закону України «Про охорону праці», а також НПАОП 0.00-1.81-18 «Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що

працює під тиском» (за наявності відповідних вузлів та систем), на виробничих об’єктах повинні бути впроваджені заходи щодо запобігання аваріям, інцидентам та відмовам обладнання.

До основних заходів техногенної безпеки належать:

– впровадження систем автоматичного контролю технологічних параметрів процесу та аварійної сигналізації відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (рос);

– забезпечення безперервного моніторингу параметрів електричного режиму з метою запобігання нестабільній роботі установки;

– застосування систем блокування та аварійного відключення обладнання при відхиленні від регламентованих режимів;

– проведення регулярної технічної діагностики механічних вузлів установки здійснюється відповідно до вимог експлуатаційної документації, а також згідно з ДСТУ 8646:2016 «Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу (строку служби) технічних систем» та ДСТУ 9050:2020 «Система технічного обслуговування та ремонтування техніки. Терміни та визначення понять»;

– використання конструктивних елементів захисту від витоку та неконтрольованого виливу розплаву;

– впровадження регламентів технічного обслуговування і планово-попереджувальних ремонтів;

– забезпечення резервування критично важливих систем живлення та керування установкою;

– організація локалізації та мінімізації наслідків аварійних ситуацій відповідно до Кодексу цивільного захисту України.

Реалізація зазначених заходів дозволяє знизити ймовірність виникнення техногенних аварій, забезпечити стабільність технологічного процесу та підвищити загальний рівень промислової безпеки при електрошлаковому переплаві.

3.4 Розрахунок захисного заземлення та захисного відключення

Розрахунок захисного заземлення та захисного відключення проводиться з метою забезпечення електробезпеки персоналу, зниження напруги дотику до безпечних значень, а також автоматичного відключення пошкоджених електроустановок у разі виникнення аварійних режимів роботи. Вимоги до виконання захисних заходів від ураження електричним струмом регламентуються ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом».

Відповідно до вимог зазначеного нормативного документа, в електросталеплавильному цеху як основний засіб захисту від ураження електричним струмом застосовується захисне заземлення, виконане за допомогою заземлювального пристрою. Такий спосіб захисту є доцільним, оскільки на підприємстві використовується трифазна система змінного струму напругою 380/220 В, а металеві корпуси електрообладнання за нормальних умов не перебувають під напругою, але можуть опинитися під нею внаслідок пошкодження ізоляції. Захисне заземлення забезпечує відведення струму замикання на землю та зменшує небезпеку ураження персоналу електричним струмом.

Для забезпечення необхідного рівня електробезпеки приймається конструкція комбінованого заземлювального пристрою, для якого виконується розрахунок опору розтікання струму замикання на землю. Вихідні дані для розрахунку наступні: вертикальні заземлювачі виконані зі сталевих труб діаметром 100 мм і довжиною 2 м. Верхні кінці вертикальних електродів з’єднуються між собою горизонтальним заземлювачем у вигляді сталевої смуги перерізом 4×40 мм, яка прокладається в ґрунті на глибині H_0 = 0,75 м (рис. 3.4). Тоді:

$$H=l/2+0,75=2/2+0,75=1,75 \text{ м}.$$

Тип заземлювального пристрою приймається як виносний контурний заземлювач. Ґрунт на ділянці встановлення – змішаний, що характеризується середніми значеннями питомого електричного опору. Кліматичний район розташування об’єкта – II, що враховується при визначенні сезонних коефіцієнтів та умов розтікання струму в ґрунті.

Розрахунок виконується з метою забезпечення нормативного значення опору заземлювального пристрою та створення безпечних умов експлуатації електрообладнання відповідно до вимог ПУЕ «Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання)».

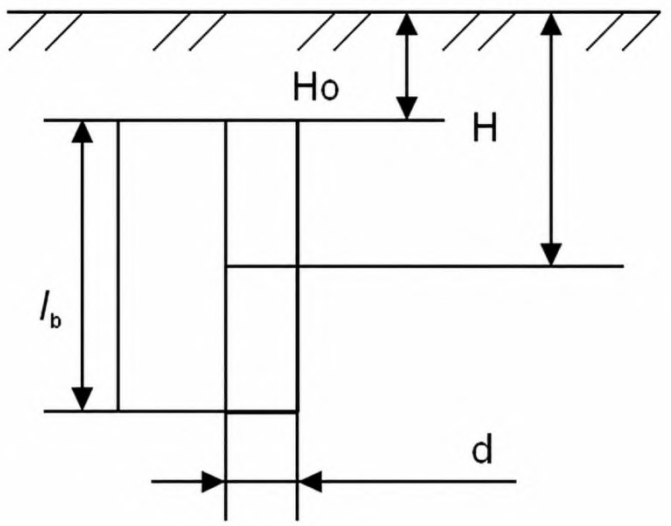


Рисунок 3.4 – Схема розташування заземлювача в ґрунті

Розрахункові опори розтікання електродів визначаються для вертикального $R_в$ та горизонтального $R_г$ електродів відповідно за наведеними нижче формулами:

$$R_B = \frac{r}{2p \times l_в} \left(\ln \frac{2 \times l_в}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H + l_в}{4H - l_в} \right) \quad (3.1)$$

де $\rho_г$ – розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом·см;

$l_в$ – довжина вертикального електрода, см;

d – діаметр електрода, см.

H – заглиблення електроду на середині його довжини (рис. 3.4), см.

Опір горизонтальної смуги:

$$R_г = \frac{r_г}{2\pi l_п} \ln \frac{2 l_п^2}{в H_0}, \quad (3.2)$$

де $H_о$ – заглиблення смуги, см;

$в$ – ширина сполучної смуги, см;

l_i – довжина сполучної смуги, см.

Розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом см:

$$r_г = \psi r, \quad (3.3)$$

де ψ – кліматичний коефіцієнт; для комбінованого заземлювача та II кліматичного району розташування об'єкту $\psi = 1{,}6$;

r - питомий опір грунту, Ом×см; для змішаного грунту

r = 10000 Ом×см.

$$r_в = \psi r = 1{,}6 \times 10000 = 1{,}6 \times 10^4 \text{ Ом см.}$$

$$R_В = \frac{1{,}6 \times 10^4}{2 \times 3{,}14 \times 200} \left(\ln \frac{2 \times 200}{10} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \times 175 + 200}{4 \times 175 - 200} \right) \approx 50{,}7 \text{ Ом.}$$

Знаходимо орієнтовну кількість вертикальних заземлювачей в контурі:

$$n = \frac{R_В}{R_Д}, \quad (3.4)$$

де $R_Д$ = 4 Ом – допустимий опір заземлювача для установок напругою до 1000 В з ізольованою нейтраллю.

$$n = \frac{50,7}{4} = 13 \text{ шт.}$$

Приймаємо відстань між заземлювачами:

$$a = 2 \cdot l_в , \quad (3.5)$$

$$a = 2 \cdot 200 = 400 \text{ см.}$$

З урахуванням того, що прийнятий заземлювач є контурним, а фактична кількість вертикальних електродів становить 13 шт., необхідно врахувати коефіцієнт використання заземлювачів, який відображає вплив їх взаємного екранування та зниження ефективності розтікання струму. Значення цього коефіцієнта приймається за довідковими даними.

Далі виконуємо уточнення розрахункової кількості вертикальних заземлювачів з урахуванням взаємного впливу електродів у контурі, що дозволяє більш точно оцінити ефективність заземлювального пристрою та забезпечити відповідність нормативному значенню опору розтікання струму. Отримане значення приймається для подальших розрахунків конструкції заземлювача.

Визначимо кількість заземлювачей з урахуванням їх взаємного екранування:

$$n_з = \frac{n}{h_{е.з}} = \frac{13}{0,66} \approx 20 \text{ шт.} \quad (3.6)$$

Довжина смуги, що сполучає заземлювачі, см:

$$l_п = 1,05 \times a \times n_з , \quad (3.7)$$

$$l_n = 1{,}05 \cdot 400 \cdot 20 = 8400 \text{ см} = 84 \text{ м}.$$

Тоді:

$$R_г = \frac{1{,}6 \times 10^4}{2 \times 3{,}14 \times 8400} \ln \frac{2 \times 8400^2}{0{,}4 \times 750} = 4 \text{ Ом}.$$

Дійсний опір горизонтального заземлювача з врахуванням взаємного екранування:

$$R_Г = \frac{R_г}{h_Г}, \tag{3.8}$$

де $\eta_Г$ = 0,34 – коефіцієнти використання заземлюючого горизонтального провідника.

$$R_Г = \frac{4}{0{,}34} = 11{,}8 \text{ Ом}.$$

Знайдемо опір розтіканню прийнятого групового заземлювача, Ом:

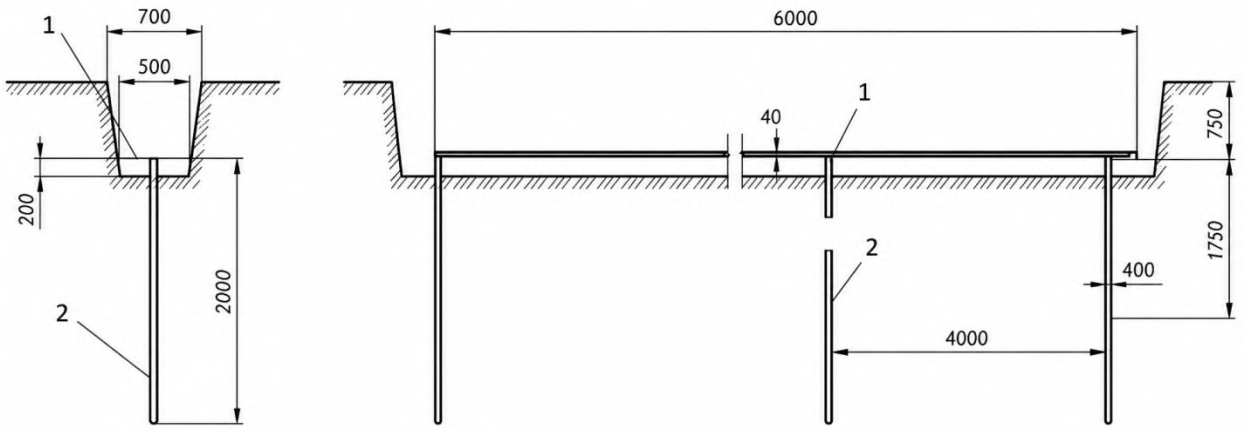
$$R = \frac{R_В \cdot R_Г}{R_В \cdot h_г + R_Г \cdot h_в \cdot n_з}, \tag{3.9}$$

$$R = \frac{50{,}7 \cdot 11{,}8}{50{,}7 \cdot 0{,}34 + 11{,}8 \cdot 0{,}66 \cdot 20} = 3{,}5 \text{ Ом}.$$

Отримане значення опору є меншим за нормативно допустиме значення $R_Д$ = 4 Ом, тому даний результат приймається як остаточний.

Таким чином, проєктований заземлювач є контурним виносним і складається з 20 вертикальних стрижневих електродів довжиною 2 м та діаметром 100 мм, а також горизонтального електрода у вигляді сталевої смуги перерізом 4×40 мм, які закладені в ґрунт на глибину 0,75 м (рис. 3.5).

Водночас можливі відмови системи заземлення. Згідно з вимогами електробезпеки необхідно забезпечити автоматичне відключення установки при замиканні фази на корпус, причому напруга дотику $U_д$ не повинна перевищувати 42 В. Для виконання цих умов передбачається застосування пристрою захисного відключення (УЗВ), який реагує на потенціал корпусу (рис. 3.6). У схемі використовується реле напруги з напругою спрацьовування U_c = 30 В, активним опором обмотки $R_р$=400 Ом, індуктивний опір $X_р$=200 Ом.



1 – смуги, що сполучає заземлювачі; 2 – заземлювач.

Рисунок 3.5 – Розташування заземлювачей трансформаторної підстанції

Далі визначаємо опір допоміжного заземлення $r_В$, за якого пристрій захисного відключення спрацює, виходячи з рівняння умови спрацьовування реле за напругою U_c. Це дозволяє встановити граничне значення опору кола керування, при якому забезпечується надійне спрацювання захисту та автоматичне відключення установки при виникненні аварійного режиму:

$$U_c = U_д \frac{\sqrt{R_p^2 + X_p^2}}{\sqrt{(R_p + r_B)^2 + X_p^2}}, \qquad (3.10)$$

де $R_р$ та $X_р$ – активний і індуктивний опіри обмотки реле, Ом;

$U_д$ – допустима напруга дотику, В.

Підставляємо відповідні значення в рівняння (3.5) напруги спрацьовування реле та отримуємо:

$$30 = 42 \times \frac{\sqrt{400^2 + 200^2}}{\sqrt{(400 + r_B)^2 + 200^2}}.$$

$$1764 \times (400^2 + 200^2) = 900 \times [(400 + r_B)^2 + 40000].$$

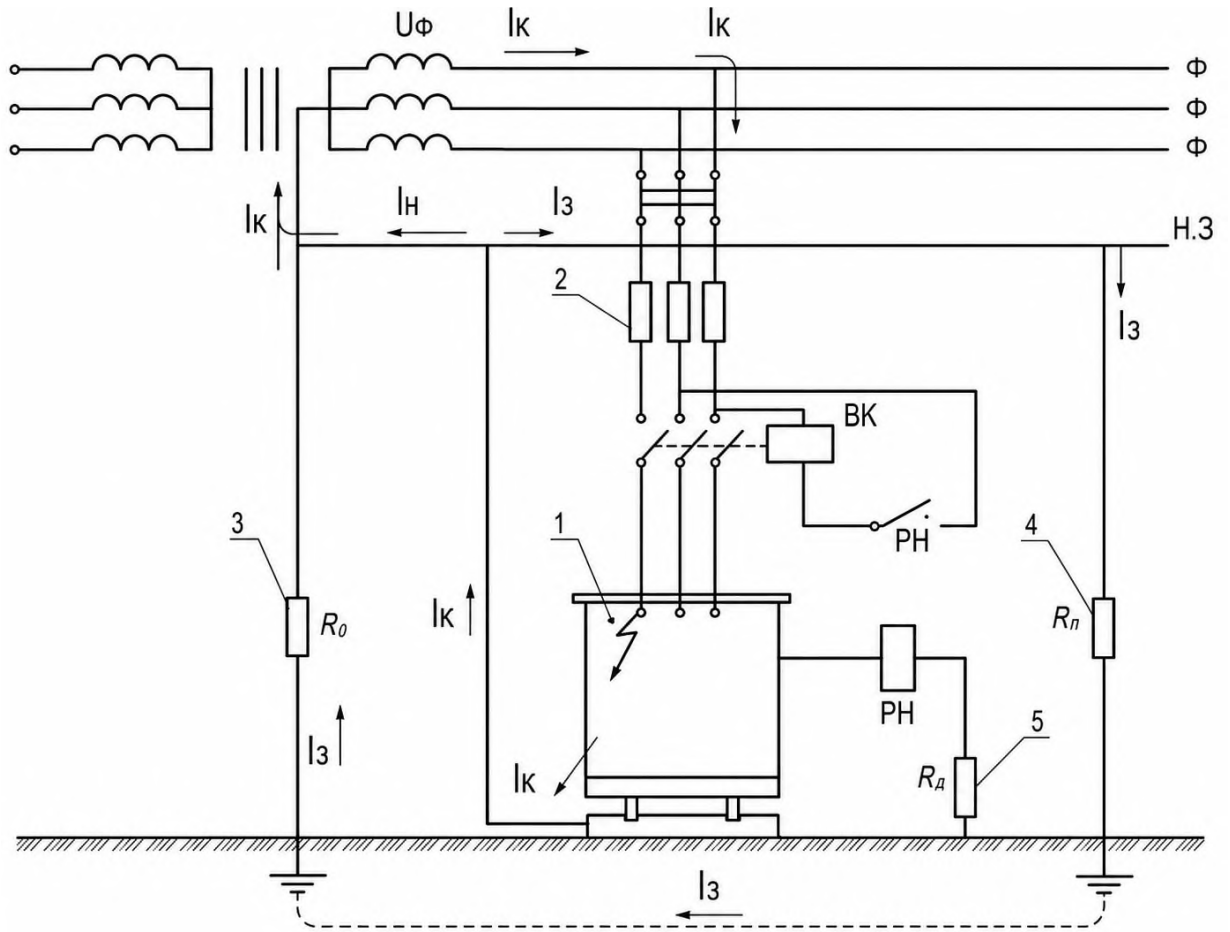
Отже:

$$r_В^2 + 800 \times r_В - 552000 = 0.$$

Звідки знаходимо опір допоміжного заземлення:

$$r_B = \frac{-800 + 1687,6}{2} = 444 \ Ом.$$

Отже, отримані результати розрахунку показали, що проєктований комбінований заземлювальний пристрій забезпечує нормативний опір розтікання струму та відповідає вимогам електробезпеки для електроустановок напругою до 1000 В, оскільки його розрахункове значення є меншим за допустиме $R_Д$ = 4 Ом. Додатково встановлено, що застосування пристрою захисного відключення забезпечує підвищення рівня безпеки персоналу шляхом автоматичного відключення установки при виникненні аварійних режимів, а розрахований опір допоміжного заземлення $r_в$ гарантує своєчасне спрацювання реле при досягненні гранично допустимої напруги дотику 42 В.



1 – трансформатор; 2 – апарати захисту від струмів КЗ (запобіжники); $R_{п}$ – опір повторного заземлення нульового проводу; R_0 – опір робочого заземлення нейтралі трансформатору; $R_д$ – опір допоміжного заземлення трансформатору; $I_к$ – струм короткого замкнення; $I_з$ – струм замкнення на землю; $I_н$ – частина струму короткого замкнення, який тече через нульовий захисний провідник; ВК – відключаюча катушка автоматичного вимикача; РН – реле напруження; Ф – фазні провідники; НЗ – нульовий захисний провідник

Рисунок 3.6 – Принципова схема захисного відключення

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Електрошлаковий переплав є одним із найефективніших способів одержання високоякісних сталей і сплавів, оскільки забезпечує глибоке рафінування металу від неметалевих включень, сірки та газів, сприяє формуванню щільної та однорідної структури зливка, зменшенню ліквацій них процесів і підвищенню комплексу механічних та корозійних властивостей готової продукції. Його важливою перевагою є спрямована кристалізація металу у водоохолоджуваному кристалізаторі, що дозволяє отримувати зливки з мінімальною пористістю, усадковими дефектами та високою якістю поверхні. Незважаючи на відносно низьку продуктивність і значну енергоємність процесу, його застосування є технологічно та економічно виправданим для виробництва відповідальних виробів із неіржавіючих, інструментальних, конструкційних і жароміцних сталей.

2. Показано, що ПрАТ «Дніпроспецсталь» є одним із провідних підприємств України у сфері електрошлакового переплаву, де експлуатується сучасне обладнання ЕШП для виробництва широкого сортаменту високоякісних сталей спеціального призначення. Використання технології ЕШП на підприємстві забезпечує випуск зливків масою до 20 т із високими показниками чистоти металу, структурної однорідності та експлуатаційної надійності.

3. Сучасні напрями удосконалення технології електрошлакового переплаву неіржавіючих сталей спрямовані на підвищення якості металу, покращення його структури та зниження виробничих витрат. Важливу роль у цьому відіграють оптимізація складу шлакових сумішей, застосування синтетичних флюсів нового покоління, автоматизація процесу переплаву та вдосконалення конструкції кристалізаторів. Використання сучасних технологічних рішень дозволяє підвищити ступінь рафінування металу, зменшити втрати легувальних елементів і забезпечити отримання злитків із високою структурною однорідністю та мінімальною кількістю дефектів.

4. Підвищення техніко-економічних показників ЕШП досягається завдяки оптимізації електричних режимів переплаву, зниженню питомих витрат електроенергії, підвищенню продуктивності агрегатів та впровадженню автоматизованих систем керування процесом. Комплексне вдосконалення технології ЕШП забезпечує отримання високоякісних неіржавіючих сталей із покращеними механічними та корозійними властивостями, підвищує конкурентоспроможність продукції та сприяє ефективному розвитку сучасного спеціального електрометалургійного виробництва.

5. Неіржавіючі сталі є важливими конструкційними матеріалами, що поєднують високу корозійну стійкість, міцність, пластичність і довговічність. Високі експлуатаційні характеристики, технологічність обробки та можливість отримання матеріалів із різними властивостями роблять неіржавіючі сталі незамінними конструкційними матеріалами сучасної промисловості.

Серед них особливе місце займає сталь AISI 304 – найпоширеніша аустенітна неіржавіюча сталь. Вона характеризується високою корозійною стійкістю завдяки вмісту 18–20 % хрому та 8–10,5 % нікелю, добрими механічними властивостями (границя міцності близько 510–740 МПа, відносне видовження до 40–45 %), широким температурним діапазоном експлуатації від –200 до +650 °C, низькою магнітною проникністю та високою технологічністю під час зварювання й обробки тиском. Завдяки поєднанню цих властивостей сталь AISI 304 широко використовується для виготовлення обладнання, трубопроводів, резервуарів, теплообмінників і виробів харчового та промислового призначення.

6. У результаті дослідження особливостей електрошлакового переплаву сталі AISI 304 із використанням різних флюсів (зокрема АНФ-1, АНФ-7, АНФ-28 та експериментальний флюс умовного позначення 3/3/3) встановлено, що склад флюсу істотно впливає на якість отриманих зливків. Найкращі результати за показниками металургійної чистоти та вмісту

неметалевих включень були отримані для зливка, переплавленого під флюсом АНФ-7. Цей зразок характеризувався найнижчим індексом забрудненості неметалевими включеннями, а також мінімальним вмістом оксидів металів у шлаковій фазі після завершення переплаву. Зразок, отриманий під флюсом АНФ-1, продемонстрував близькі значення індексу забрудненості, проте мав найбільший вплив на зміну концентрації кремнію та марганцю в металі, що свідчить про його підвищену реакційну активність у процесі шлакометалевої взаємодії.

7. Приведено розрахунок в'язкості флюсів для електрошлакового переплаву методом рівних сум, який дозволяє визначити в’язкість розплавлених флюсів для ЕШП при різних температурах без проведення експериментів.

8. Встановлено, що робота біля установок електрошлакового переплаву супроводжується впливом комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких основними є висока температура розплавленого металу та шлаку, інтенсивне теплове й світлове випромінювання, ризик ураження електричним струмом через використання потужного електрообладнання, а також можливе виділення шкідливих газів і аерозолів, тому безпечне виконання робіт можливе лише за умови суворого дотримання вимог охорони праці та застосування засобів індивідуального й колективного захисту.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Марки нержавіючої сталі. URL: https://metallgroup.com.ua/marki-nerjaviuchij-stali.html (дата звернення: 03.06.2026)

2. Як визначити нержавіючу сталь: способи й матеріали. URL: https://metal-holding.ua/ua/blog/kak-opredelit-nerzaveusuu-stal-sposoby-i-materialy/?srsltid=AfmBOop4EK-jt01fXv308Nno5nn6voqd48V33Uw1wlfZTvfPNcK2Je5I (дата звернення: 03.06.2026)

3. Нержавіюча сталь 08Х18Н10. URL: https://upt.com.ua/stati/nerzhaviika-08x18h10 (дата звернення: 02.06.2026)

4. Вироби з нержавіючої сталі: переваги та можливості. URL: https://ten24.com.ua/ua/blog/virobi-z-nerzhaviyuchoi-stali-perevagi-ta-mozhlivosti/ (дата звернення: 03.06.2026)

5. ДСТУ EN 10088-1:2019. Сталі неіржавкі. Частина 1. Перелік неіржавких сталей (EN 10088-1:2014, IDT) ; прийнятий 30.10.2019 р. ; чинний від 01.11.2019 р.

6. ДСТУ EN 10088-2:2010. Сталі неіржавкі. Частина 2. Лист і стрічка з корозійнотривких сталей загальної призначеності. Технічні умови постачання (EN 10088-2:2005, IDT) ; прийнятий 28.12.2010 р. ; чинний від 01.01.2012 р.

7. ДСТУ EN 10088-3:2010. Сталі неіржавкі. Частина 3. Напівготова продукція, заготовки, прутки, дріт, профілі та полірована продукція з корозійнотривких сталей загальної призначеності. Технічні умови постачання (EN 10088-3:2005, IDT) ; прийнятий 28.12.2010 р. ; чинний від 01.01.2012 р.

8. ДСТУ EN 10088-4:2019. Сталі неіржавкі. Частина 4. Технічні умови постачання тонкого/товстого листа та штаби з корозійнотривких сталей конструкційного призначення (EN 10088-4:2009, IDT) ; прийнятий 26.12.2019 р. ; чинний від 01.01.2020 р.

9. ДСТУ EN 10088-5:2019. Сталі неіржавкі. Частина 5. Технічні умови постачання прутків, стрижнів, дроту, профілів та полірованих виробів з корозійнотривких сталей конструкційного призначення (EN 10088-5:2009, IDT) ; прийнятий 26.12.2019 р. ; чинний від 01.01.2020 р.

10. Нержавіючі сталі для виробництва кріплення. Види та властивості. URL: https://maysterfix.com/ua/a330365-nerzhaveyuschie-stali-dlya.html?srsltid=AfmBOordoW6c9HCw3gHxR_UG6eEH6g95YSsxRnsIfFhDPvi0B2pPr9eY (дата звернення: 07.06.2026)

11. Марки харчової нержавійки та їхні аналоги. URL: . https://armashop.ua/tekhnicheskiy-spravochnik/marki-pishchevoy-nerzhaveyki-i-ikh-analogi/?srsltid=AfmBOoos90Niw4upvpJEa3g_nevUlebT5NHTaINTXXYOdQkApFQeEljw (дата звернення: 07.06.2026)

12. 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» Г. О. Ремізов, Ю. Я. Готвянський, В. Ю. Сухенко. Київ : НТУУ «КПІ», 2010.

13. Воденнікова О. С. Металургія чорних металів : конспект лекцій для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія». Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 144 с.

14. Воденніков С. А., Тарасов В. К., Воденнікова О. С. Конструкції агрегатів чорної металургії : навч. посібн. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 192 с. ISBN 978-966-8462-69-6

15. Медовар Л. Б., Полішко Г. О., Петренко В. Л., Стовпченко Г. П. Сучасні електрошлакові технології переплаву електроду та переробка рідкого металу (огляд). *Теорія і практика металургії*. 2929. №2. С. 17–25. https://doi.org/10.34185/tpm.2.2020.03

16. Electroslag Remelting Process: Part One. URL: https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=226

(дата звернення: 07.06.2026)

17. Електрошлаковий переплав (Inteco). https://gertnergroup.com/product/elektroshlakovyy-pereplav-inteco/?lang=ua (дата звернення: 09.06.2026)

18. ПрАТ «Дніпроспецсталь». Виробництво. URL: https://dniprospetsstal.com/kompaniya/vyrobnycztvo-2/ (дата звернення: 09.06.2026)

19. Сталь AISI 304. URL: https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-aisi-304/?srsltid=AfmBOor9Z4xNg- (дата звернення: 09.06.2026)

20. СТАЛЬ AISI 304 / W 1,4301 (A2) / 08Х18Н10. https://dinmark.com.ua/marky_stali/stal-aisi-304T3DpGbMDs_tmpf7wlVn5mlpuZTBPvdNVZOlj_N88n_ (дата звернення: 12.06.2026)

21. Сталь AISI 304. https://westa.kiev.ua/ua/standarty/marki-stali/stal-aisi-304 (дата звернення: 12.06.2026)

22. Нержавіюча сталь AISI 304. URL: Детальніше: https://dymohid.lviv.ua/ua/a306989-nerzhaviyucha-stal-aisi.html (дата звернення: 12.06.2026)

23. Ямшинський М. М., Лавренюк М. С., Трикозенко Д. І. Дослідження електрошлакового переплаву нержавіючої сталі AISI 304 під різними флюсами. *Сучасна електрометалургія*. 2025. №3. С. 64–70. https://doi.org/10.37434/sem2025.03.06

24. Ковейнік А. В., Воденнікова О. С. Дослідження впливу флюсу АНФ-6 на якість металу при електрошлаковому переплаві. Збірник наукових праць магістрантів кафедри МЧМ. Випуск 11. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. С. 42–48.

25. Парахнєвич Є. М., Івахненко Є. І., Петруша Ю. П., Кудін В. В., Воденнікова О. С. Особливості розподілу неметалевих вкраплень при електрошлаковому наплавленні з великим вмістом сірки. *Метал та лиття України*. 2024. Т. 32. № 2(337). С. 48–57.

26. Парахнєвич Є. М., Івахненко Є. І., Воденнікова О. С. Щодо особливостей розподілу неметалевих вкраплень при електрошлаковому наплавленні з великим вмістом сірки. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2024: XVI Міжнародна науково-технічна конференція (Київ, 25–26 квітня 2024р.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 288–289.

27. Закон України «Про охорону праці» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 49, ст. 668). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text (дата звернення: 16.06.2026).

28. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ; затверджений 01.12.1999 р. ; чинний від 01.12.1999 р.

29. НПАОП 0.00-1.80-18. Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання ; прийнятий 16.05.2018 р. ; чинний від 16.05.2018 р.

30. ДСТУ EN 12198-1:2018. Безпечність машин. Оцінювання та зниження ризиків, що виникають від випромінення, випромінюваного машиною. Частина 1. Загальні принципи (EN 12198-1:2000 + A1:2008, IDT) ; прийнятий 15.08.2018 р. ; чинний від 01.10.2019 р.

31. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ; затверджений 01.12.1999 р. ; чинний від 01.12.1999 р.

32. ДСанПіН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів ; затверджений 18.12.2002 р. ; чинний від 18.12.2002 р.

33. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні ; затверджений 30.12.2014 р. ; чинний від 10.04.2015 р.

34. Закон України «Про пожежну безпеку» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1994, № 5, ст. 21). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3745-12#Text (дата звернення:

16.06.2026).

35. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів ; затверджений 09.01.1998 р. ; чинний від 01.07.1998 р.

36. ДСТУ EN 3-7:2004. Вогнегасники переносні. Частина 7. Характеристики, вимоги до робочих показників та методи випробування ; чинний від 01.10.2005 р.

37. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці ; прийнятий 26.01.2005 р. ; чинний від 15.02.2005 р.

38. Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2001, № 15, ст. 73). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text (дата звернення: 16.06.2026).

39. НПАОП 0.00-1.81-18. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском ; прийнятий 05.03.2018 р. ; чинний від 25.05.2018 р.

40. ДСТУ 8646:2016. Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу (строку служби) технічних систем ; прийнятий 31.05.2016 р. ; чинний від 01.07.2017 р.

41. ДСТУ 9050:2020. Система технічного обслуговування та ремонтування техніки. Терміни та визначення понять ; прийнятий 02.09.2020 р. ; чинний від 01.04.2021 р.

42. Вахонєва Т. М. Основи охорони праці в Україні : навч. посіб. Київ : ВД «Дакор», 2019. 508 с.

43. Бердій Я. І. Основи охорони праці : навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів. Вид. 4-те перероб. і доп. Тернопіль : Навчальна книга- Богдан, 2014. 240 с.

44. Геврик Є. О. Охорона праці : навч. посіб. для студ. внз. Київ : Ельга, НікаЦентр, 2004. 280 с.

45. Наказ 05.11.2018 № 879 Про затвердження Правил техногенної безпеки. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1346-18#Text (дата звернення: 16.06.2026).

46. Техногенна безпека на небезпечних об’єктах. URL: https://ohoronapraci.kiev.ua/article/news/tehnogenna-bezpeka-na-nebezpecnih-obektah (дата звернення: 16.06.2026).

47. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом ; прийнятий 01.07.2016 р. ; чинний від 01.04.2017 р.

48. ПУЕ. Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). Харків : Форт, 2017. 760 с.

49. Воденнікова О. С., Воденніков С.А. Сучасні підходи до стандартизації охорони праці в металургії: порівняльний аспект та перспективи гармонізації з міжнародними стандартами. *Металургія*. 2026. №1. С. 95–115.

50. Воденніков С. А., Нестеренко Т. М., Воденнікова О. С. Бакалаврська робота : методичні вказівки до написання та оформлення випускної кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів ЗДІА спеціальності 136 «Металургія» (спеціалізації «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів») галузі знань 13 «Механічна інженерія» денної та заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 68 с.