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 *«Аналіз сучасних способів розливки сталей та сплавів»*

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

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

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

Костерний Олександр Вікторович
(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

Костерному Олександру Вікторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) *«Аналіз сучасних способів розливки сталей та сплавів»*

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 та розвиток технологій розливки сталей та сплавів. Дослідження сучасного стану та тенденцій розвитку технологій розливки сталей та сплавів. Розрахунок основних параметрів процесів розливки сталі. 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 – 5. Розділ 2 – 6. Розділ 3 – . Розділ 4 – 0. Загальні висновки – 2.*

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Теоретичні основи та розвиток технологій розливки сталей та сплавів	*Воденнікова О.С., доцент*	
Дослідження сучасного стану та тенденцій розвитку технологій розливки сталей та сплавів	*Воденнікова О.С., доцент*	
Розрахунок основних параметрів процесів розливки сталі	*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 та розвиток технологій розливки сталей та сплавів*		
3	*Дослідження сучасного стану та тенденцій розвитку технологій розливки сталей та сплавів*		
4	*Розрахунок основних параметрів процесів розливки сталі*		
5	*Охорона праці та техногенна безпека*		
6	*Загальні висновки. Перелік джерел посилання*		
7	*Графічна частина*		

Студент _____ *Олександр КОСТЕРНИЙ*
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 94 с., 38 рис., 3 табл., 34 джерела посилання.

РОЗЛИВКА СТАЛІ, РОЗЛИВКА СПЛАВІВ, ВИЛИВНИЦЯ, МАШИНА БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК, МЕТАЛУРГІЙНЕ ВИРОБНИЦТВО, ЯКІСТЬ МЕТАЛУ, ЗЛИВОК, ЗАГОТОВКА, ДЕФЕКТИ МЕТАЛУ

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: Аналіз сучасних способів розливки сталей та сплавів.

Мета роботи – провести аналіз сучасних способів розливки сталей та сплавів, дослідити особливості процесів кристалізації металу, оцінити сучасний стан і перспективи розвитку технологій розливки, а також виконати розрахунок основних параметрів процесів розливки сталі.

У розділі 1 розглянуто класифікацію способів розливки, особливості роботи МБЛЗ різних типів, а також основні дефекти сталевих зливків і безперервнолитих заготовок та причини їх виникнення.

У розділі 2 проаналізовано досвід України та світову практику безперервного лиття заготовок, розглянуто особливості ливарно-прокатних агрегатів, а також виконано порівняльний аналіз технологічних, якісних та економічних показників різних способів розливки металу.

У розділі 3 приведено розрахунок схеми літникової системи для розливки сталі у виливниці сифоном, а також виконано вибір типу машин МБЛЗ і розрахунок їх необхідної кількості для сталеплавильного цеху заданої продуктивності.

У розділі 4 виконано аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів розливного відділення, наведено заходи щодо забезпечення безпечних умов праці та висвітлено екологічні аспекти й напрями підвищення безпеки сучасних технологій розливки металів.

ЗМІСТ

ВСТУП……..…….... 7
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ РОЗЛИВКИ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ……....…….. 9
1.1 Призначення та роль процесу розливки сталей та сплавів у металургійному виробництві..... 9
1.2 Класифікація способів розливки сталей та сплавів……. 10
1.2.1 Розливка металу у виливниці……..... 11
1.2.2 Розливка металу на машинах безперервного лиття заготовок……. 17
1.2.2.1 Розливка металу на МБЛЗ вертикального типу……..… 19
1.2.2.2 Розливка металу на МБЛЗ радіального типу……. 21
1.2.2.3 Розливка металу на МБЛЗ криволінійного типу……..…. 22
1.2.2.4 Розливка металу на МБЛЗ горизонтального типу…… 24
1.2.3 Способи розливки феросплавів……..…… 25
1.2.4 Способи розливки кольорових металів та сплавів…… 28
1.3 Дефекти поверхні сталевого зливка ……. 31
1.4 Дефекти поверхні безперервнолитих заготовок……. 36
2 ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗЛИВКИ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ……. 41
2.1 Досвід України в розливці сталей та сплавів…… 41
2.2 Світові тенденції розвитку технологій розливки металів та перехід до безперервного лиття заготовок…….. 47
2.3 Ливарно-прокатні агрегати як ефективний засіб інтеграції процесів лиття та прокатки…… 54
2.4 Порівняльний аналіз технологічних, якісних та економічних показників способів розливки металу……. 58
2.5 Перспективи розвитку сучасних технологій розливки сталей та сплавів 60
3 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ РОЗЛИВКИ

СТАЛІ…….. 62
3.1 Розрахунок схеми літникової системи для розливки сталі у виливниці сифоном……. 62
3.2 Вибір типу машин безперервного лиття заготовок і розрахунок їх необхідної кількості для сталеплавильного цеху заданої продуктивності. 68
3.2.1 Вибір швидкості розливки та обчислення протяжності зони вторинного охолодження…….. 69
3.2.2 Розрахунок тривалості циклу роботи МБЛЗ…….. 70
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА……..….... 77
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів у розливному відділенні……..……... 77
4.1.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час розливки сталі у виливниці……. 77
4.1.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час розливки сталі на МБЛЗ…… 79
4.2 Заходи щодо забезпечення безпеки праці під час розливки сталей та сплавів …..... 81
4.2.1 Заходи щодо забезпечення безпеки праці під час розливки сталей у виливниці…… 81
4.2.1 Заходи щодо забезпечення безпеки праці під час розливки сталей на МБЛЗ…….. 82
4.3 Екологічні аспекти та підвищення безпеки сучасних технологій розливки сталей та сплавів……..... 83
4.4 Нормативні документи з охорона праці у розливному відділенні……... 86
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……... 88
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ……..... 91

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку металургійної промисловості особливого значення набуває підвищення ефективності виробництва сталі та забезпечення високої якості металопродукції. Одним із ключових етапів сталеплавильного виробництва є процес розливки металу, від якого значною мірою залежать структура, властивості та якість готової продукції. Традиційна технологія розливки сталі у виливниці тривалий час була основним способом отримання заготовок, проте в сучасних умовах вона поступово втрачає свою конкурентоспроможність через значні втрати металу, високу енергоємність, трудомісткість процесу та обмежені можливості щодо забезпечення стабільної якості продукції.

Світові тенденції розвитку металургії свідчать про активний перехід від розливки у виливниці до розливки на машинах безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Використання МБЛЗ дозволяє суттєво скоротити виробничий цикл, підвищити вихід придатного металу, зменшити витрати енергетичних і матеріальних ресурсів, а також покращити макро- та мікроструктуру заготовок. Крім того, безперервне лиття забезпечує високий рівень автоматизації процесу та створює передумови для інтеграції розливки з подальшими операціями гарячої деформації.

Перехід до технології безперервного лиття є одним із пріоритетних напрямів модернізації металургійних підприємств, оскільки дозволяє підвищити їхню економічну ефективність та конкурентоспроможність на світовому ринку. Разом із тим поряд із традиційною та безперервною розливкою застосовуються й інші спеціальні способи отримання заготовок і виливків для виробництва сталей та сплавів із підвищеними вимогами до якості.

У зв’язку з цим актуальним є аналіз сучасних способів розливки сталей та сплавів, оцінювання їх технологічних можливостей, переваг і недоліків, а також визначення перспективних напрямів розвитку технологій формування литих

заготовок у металургійному виробництві.

Мета роботи – провести аналіз сучасних способів розливки сталей та сплавів, дослідити особливості процесів кристалізації металу, оцінити сучасний стан і перспективи розвитку технологій розливки, а також виконати розрахунок основних параметрів процесів розливки сталі.

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

– провести аналіз існуючих способів розливки сталей і сплавів та дослідити їх технологічні особливості, переваги і недоліки;

– дослідити процеси кристалізації металу під час розливки у виливниці та на машинах безперервного лиття заготовок, а також визначити основні дефекти литого металу та причини їх виникнення;

– проаналізувати сучасний стан розвитку технологій розливки сталі в Україні та світі, визначити основні тенденції вдосконалення обладнання і технологічних процесів;

– виконати розрахунок параметрів розливки сталі у виливниці сифоном, визначивши основні характеристики літникової системи;

– обґрунтувати вибір типу та кількості машин безперервного лиття заготовок для сталеплавильного цеху заданої продуктивності та розрахувати основні технологічні параметри процесу безперервної розливки;

– провести аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів у розливному відділенні та розробити заходи щодо забезпечення безпечних умов праці й охорони навколишнього середовища.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ РОЗЛИВКИ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ

1.1 Призначення та роль процесу розливки сталей та сплавів у металургійному виробництві

Розливка сталі та сплавів є одним із завершальних етапів металургійного виробництва, під час якого рідкий метал після виплавки в кисневих конвертерах, дугових сталеплавильних або індукційних печах та подальшої позапічної обробки у печі-ковші (доведення хімічного складу, розкиснення, легування, десульфурація, вакуумування та перемішування інертним газом) перетворюється на твердий зливок або заготовку визначеної форми та розмірів. Залежно від подальшого призначення продукції можуть отримуватися зливки масою від кількох сотень кілограмів до десятків тонн, блюми перерізом 250×250–400×400 мм, квадратні заготовки перерізом 100×100–200×200 мм, сляби товщиною 150–300 мм і шириною до 2500 мм, а також круглі заготовки діаметром 150–600 мм.

Процес розливки відіграє визначальну роль у формуванні макро- та мікроструктури металу, від яких залежать його механічні властивості, зокрема межа міцності, межа текучості, пластичність, ударна в'язкість, твердість і втомна міцність. Важливе значення мають також показники якості поверхні, що характеризуються відсутністю тріщин, закатів, підповерхневих дефектів, газових раковин, шлакових включень та інших недосконалостей, які можуть негативно впливати на експлуатаційні властивості продукції та ускладнювати її подальшу обробку.

Основним завданням розливки є отримання металопродукції з високим виходом придатного металу, мінімальними втратами та заданими показниками якості. Під час кристалізації відбуваються складні фізико-хімічні процеси, пов'язані з теплообміном, усадкою металу, ліквацією домішок і формуванням внутрішньої будови заготовки. Для зливків, одержаних у виливницях,

характерні усадкові дефекти, зональна ліквація та структурна неоднорідність, що потребує значних ступенів деформації під час подальшої прокатки або кування. Натомість безперервне лиття забезпечує більш рівномірну кристалізацію, зменшення внутрішніх дефектів, підвищення виходу придатної продукції та скорочення витрат металу й енергії.

1.2 Класифікація способів розливки сталей та сплавів

Способи розливки сталей і сплавів (рис. 1.1) класифікують за різними ознаками, що дозволяє систематизувати технологічні процеси отримання зливків і безперервнолитих заготовок та обґрунтувати вибір оптимальної технології залежно від умов виробництва і вимог до якості продукції.

За характером процесу розливки розрізняють на:

1. Розливка металу у форми (виливниці) (передбачає заливання металу у виливниці з отриманням окремих зливків, які після кристалізації використовуються для подальшої обробки тиском).

2. Безперервна розливка металу (передбачає процес отримання заготовки шляхом безперервного затвердіння рідкої сталі під час її руху через кристалізатор і зону вторинного охолодження. У метал поступово переходить із рідкого стану в твердий із формуванням суцільної заготовки заданого перерізу та довжини).

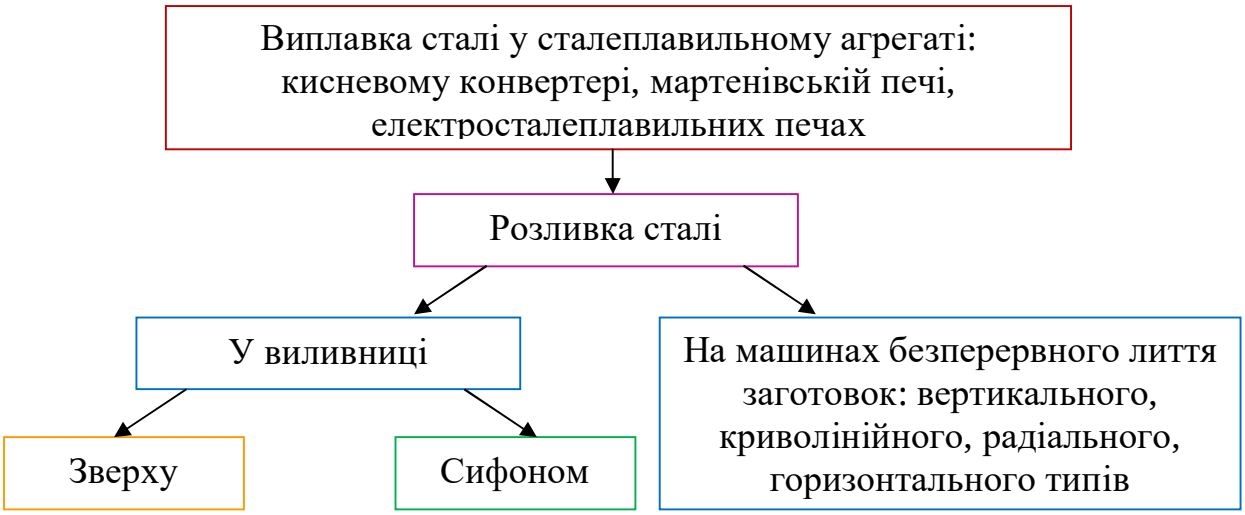
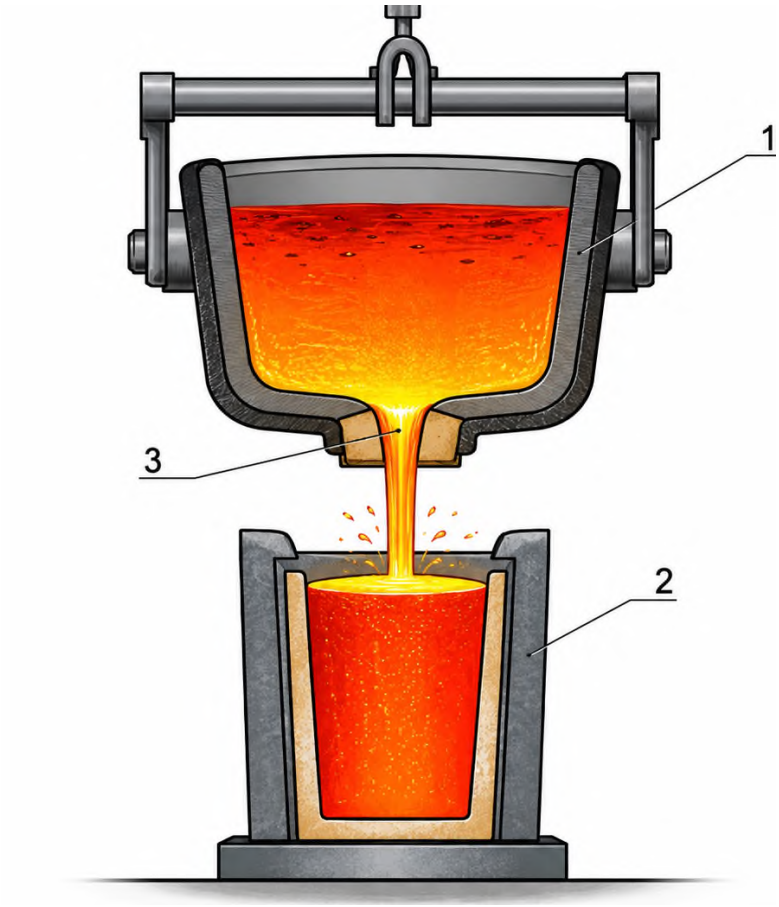


Рисунок 1.1 – Сучасні способи розливки сталі

1.2.1 Розливка металу у виливниці

Розливка сталі у виливниці є традиційним способом отримання зливків, який поділяють на два основні варіанти: розливку зверху (рис. 1.2) та сифонну розливку (знизу) (рис. 1.3).

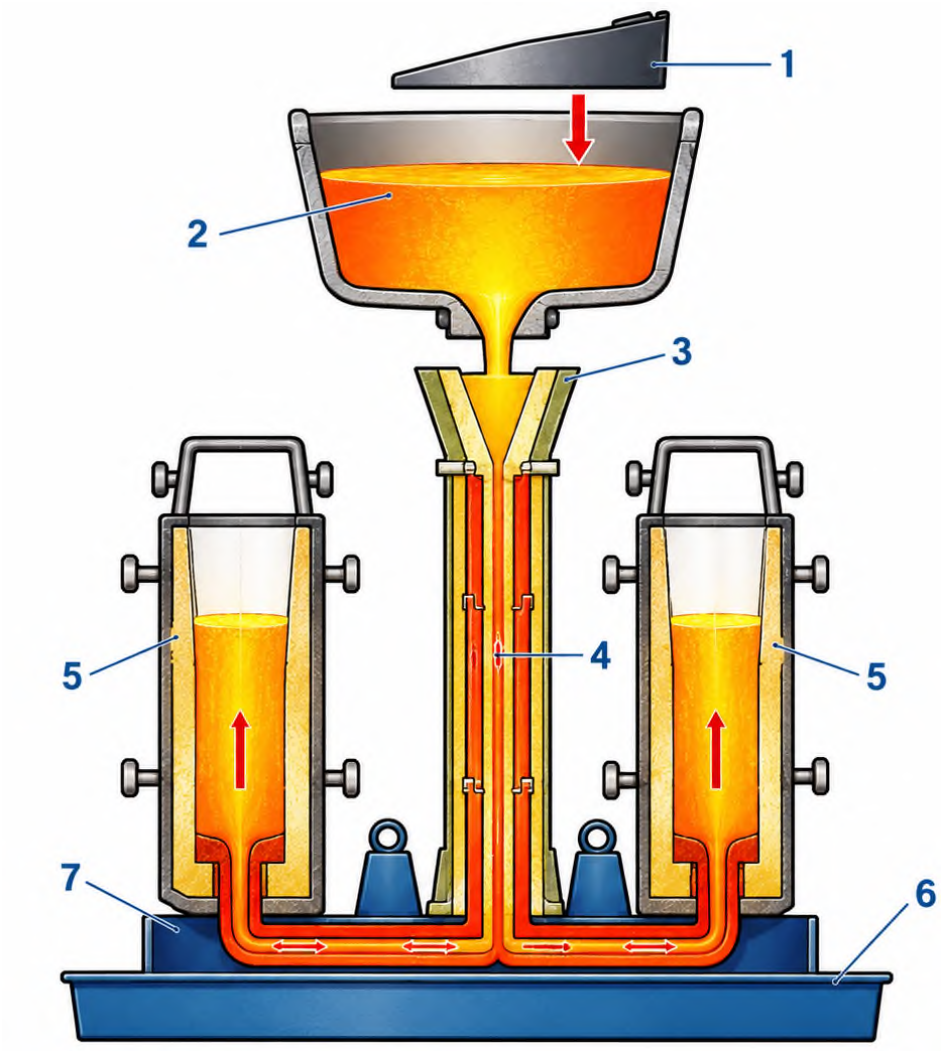
Розливка зверху застосовується переважно у випадках, коли необхідно отримати невелику кількість великих зливків. Цей спосіб дозволяє використовувати сталь з дещо нижчою температурою перегріву, що сприяє формуванню більш щільної структури зливка та зменшенню усадкової раковини. Водночас якість поверхні може погіршуватися через розбризкування металу при ударі струменя об дно виливниці. Така технологія характеризується відносно простою підготовкою обладнання та нижчими витратами на оснащення.



1 – сталерозливний ківш; 2 – виливниця; 3 – шамотна пробка ковша

Рисунок 1.2 – Схема розливки сталі зверху

Розливка сифоном (знизу) застосовується у випадках, коли необхідно одночасно розливати сталь у декілька виливниць (зазвичай від 2 до 6 і більше (рис. 1.4 та рис.1.5)). Заповнення форми відбувається через систему підвідних каналів, що забезпечує більш спокійний підйом металу у виливниці та формування якіснішої поверхні зливка без значного окиснення та розбризкування.



1 – сталерозливний ківш; 2 – рідка сталь; 3 – центровий літник; 4 – вогнетривкі трубки; 5 – виливниця; 6 – піддон; 7 – з'єднувальні канали

Рис. 1.3. Схема розливки сталі сифоном

Сучасні конструкції сифонних систем можуть включати кущі на 4–6 виливниць для зливків масою до 1,5–2,0 т, що дозволяє підвищити

продуктивність процесу розливки.

Основними параметрами, що визначають якість зливка, є його маса, геометричні розміри поперечного перерізу, висота, форма, радіуси заокруглення кутів і ухил граней. Ці параметри підбираються з урахуванням вимог подальшої обробки тиском, можливостей кранового обладнання, нагрівальних печей і прокатних станів.

Тривалість розливки залежить від маси плавки, кількості виливниць і швидкості подачі металу. При розливці зверху одна плавка зазвичай розливається протягом 20–60 хвилин, тоді як при сифонній розливці загальна тривалість процесу може скорочуватися до 15–40 хвилин завдяки одночасному заповненню кількох виливниць. При цьому швидкість підйому металу у формі регулюється для забезпечення якісної кристалізації.

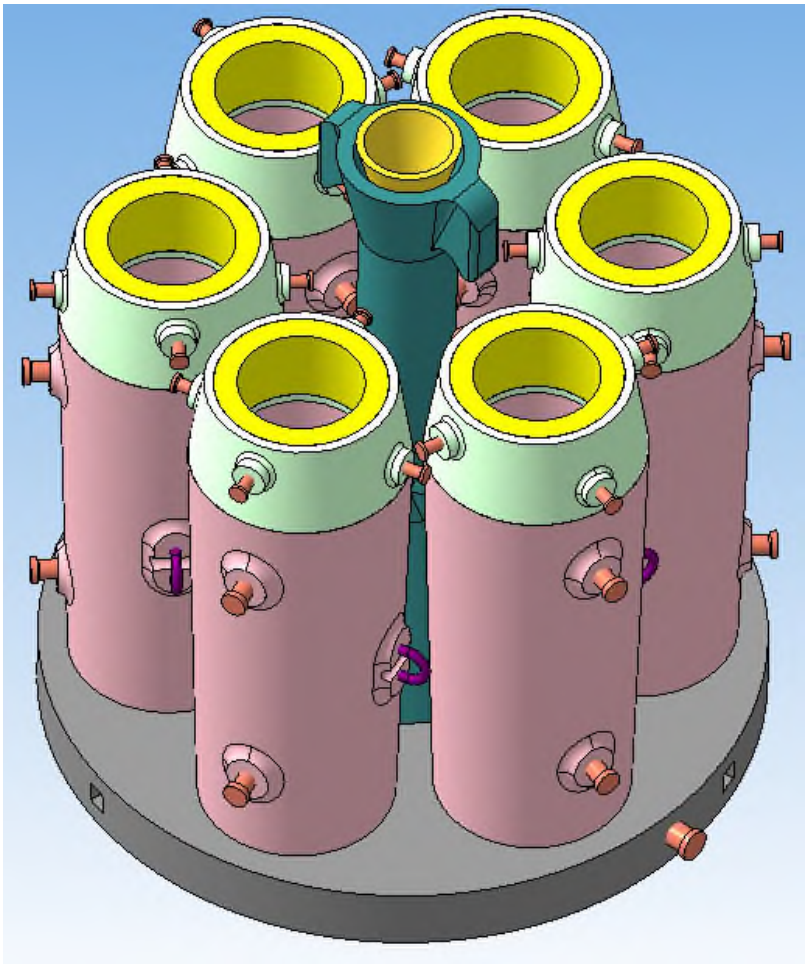
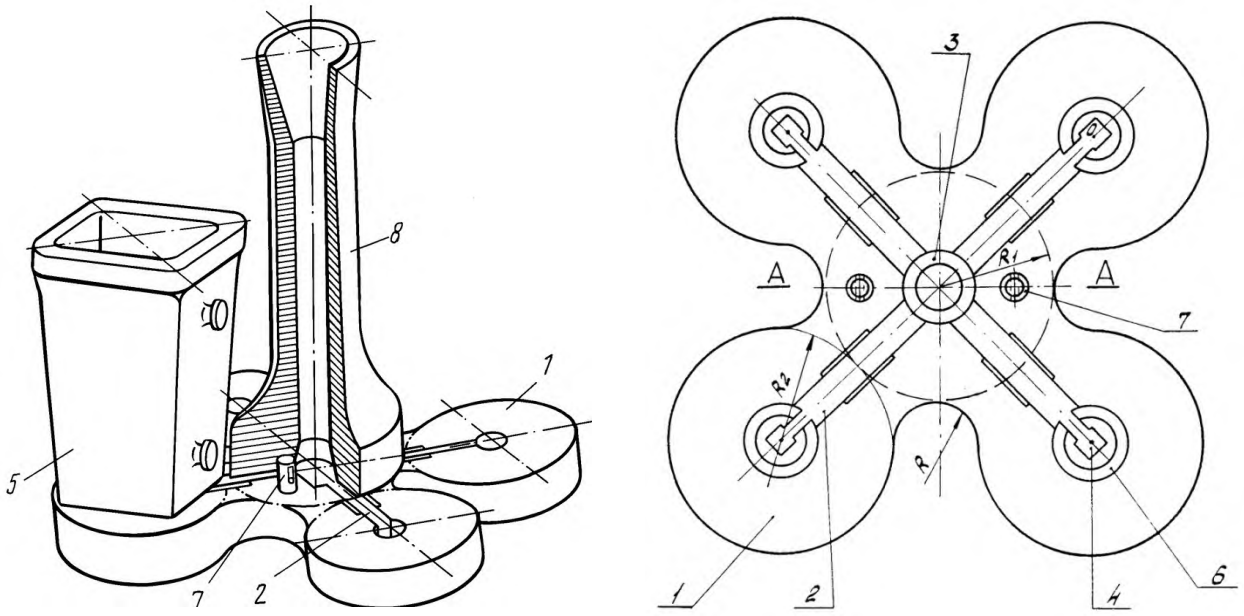


Рисунок 1.4 – 3D-модель сифонного куща на шість виливниць для розливки сталі



а б

а – вид спереду; б – вид зверху;

1 – піддон; 2 – струми; 3 – гніздо; 4 – стакан; 5 – виливниця; 6 – піддон;

7 – фіксуючі стрижні; 8 – центрова

Рисунок 1.5 – Схема сифонного куща на чотири виливниці для розливки сталі

Сортамент сталей і сплавів, які розливають у виливниці, є досить широким і включає:

– вуглецеві сталі звичайної якості;

– якісні вуглецеві сталі;

– низьколеговані та леговані конструкційні сталі;

– інструментальні сталі;

– спеціальні леговані сталі (зокрема нержавіючі та жароміцні марки);

– окремі види сплавів спеціального призначення.

Зазвичай розливка зверху застосовується для невеликої кількості великих зливків і простіших марок сталі, тоді як сифонна розливка переважає при виробництві високоякісних, легованих та відповідальних марок сталі, де висуваються підвищені вимоги до чистоти металу та якості поверхні.

Перевагою розливки зверху є простота технології, нижча вартість

обладнання та відсутність втрат металу на сифонну систему. Недоліками є підвищена ймовірність поверхневих дефектів і більша трудомісткість при розливці великих плавок.

Сифонна розливка забезпечує кращу якість поверхні та більш стабільні умови кристалізації, однак має підвищену собівартість, додаткові втрати металу на літникову систему (приблизно 0,7–2,5 %) та більшу складність підготовчих операцій.

Загальні втрати металу при обох способах (скрап, недоливи та технологічні втрати) становлять у середньому 0,6–1,9 % маси плавки.

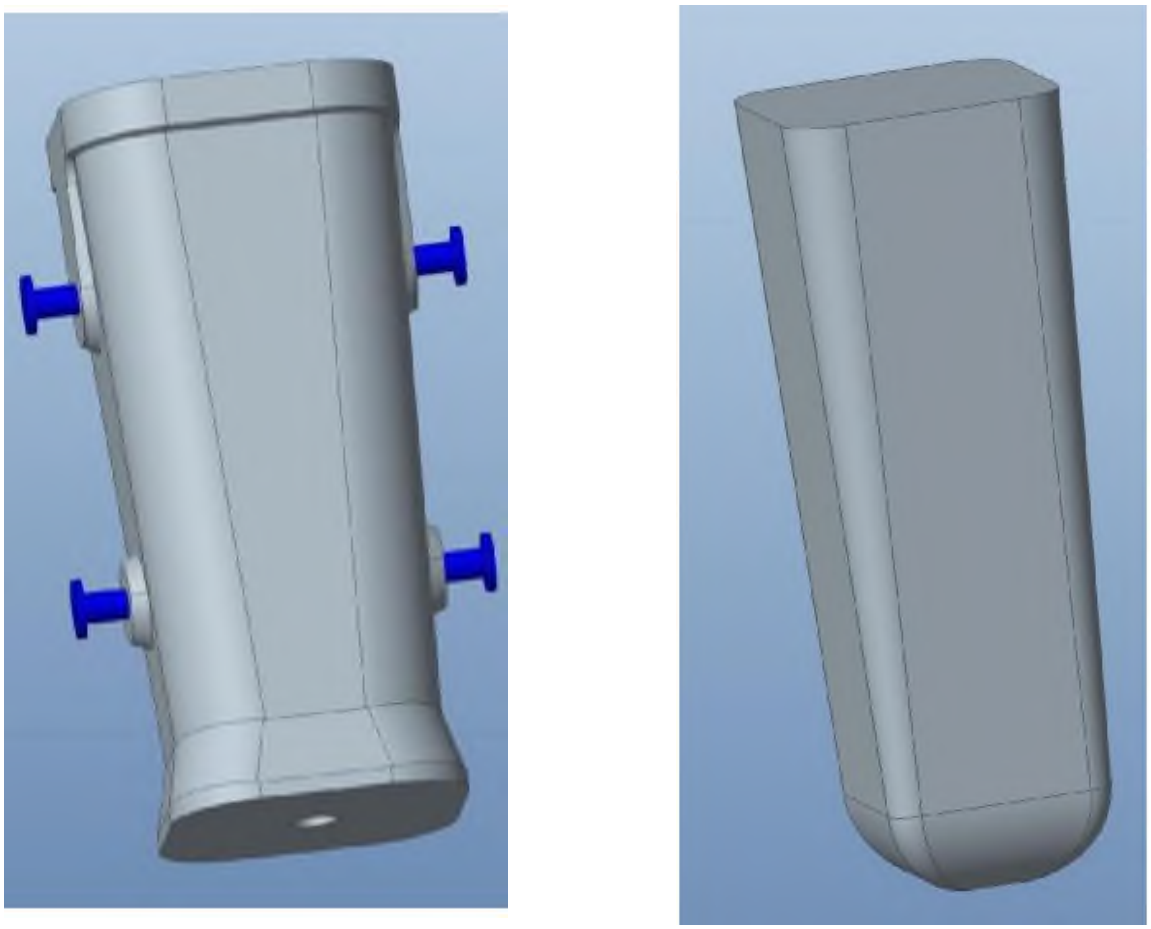
Виливниці (рис. 1.6) зазвичай виготовляють із чавуну, отриманого у вагранках або інколи безпосередньо з доменної печі. Це зумовлено тим, що чавун має невисоку вартість, характеризується добрими ливарними властивостями, а відливки з нього при нагріванні практично не зазнають короблення.



Рисунок 1.6 – Виливниці в умовах металургійного виробництва

3D-модель сучасної виливниці для розливки сталі та 3D-модель зливка наведені на рис. 1.7.

Для розливки киплячої та напівспокійної сталі зверху або сифоном застосовують наскрізні виливниці, які мають форму, розширену донизу. Така конструкція забезпечує зручність у процесі заливки металу, підвищує технологічність виготовлення виливниць і спрощує їх подальшу експлуатацію, що особливо важливо в умовах масового виробництва. Виливниці такого типу відзначаються простотою конструкції та достатньою надійністю під час тривалої роботи в агресивних термічних умовах. Натомість для розливки спокійної сталі використовують виливниці, що мають розширення догори, оскільки така форма сприяє більш рівномірному кристалізуванню металу та покращує якість отриманого зливка.



а *б*

Рисунок 1.7 – 3D-модель сучасної виливниці для розливки сталі (*а*) та 3D-модель зливка (*б*)

Поздовжній розріз двох типів зливків (рис. 1.8) демонструє характерні внутрішні дефекти лиття – усадкову раковину та пористість, які утворюються в процесі кристалізації металу через нерівномірне живлення розплаву та виділення газів.

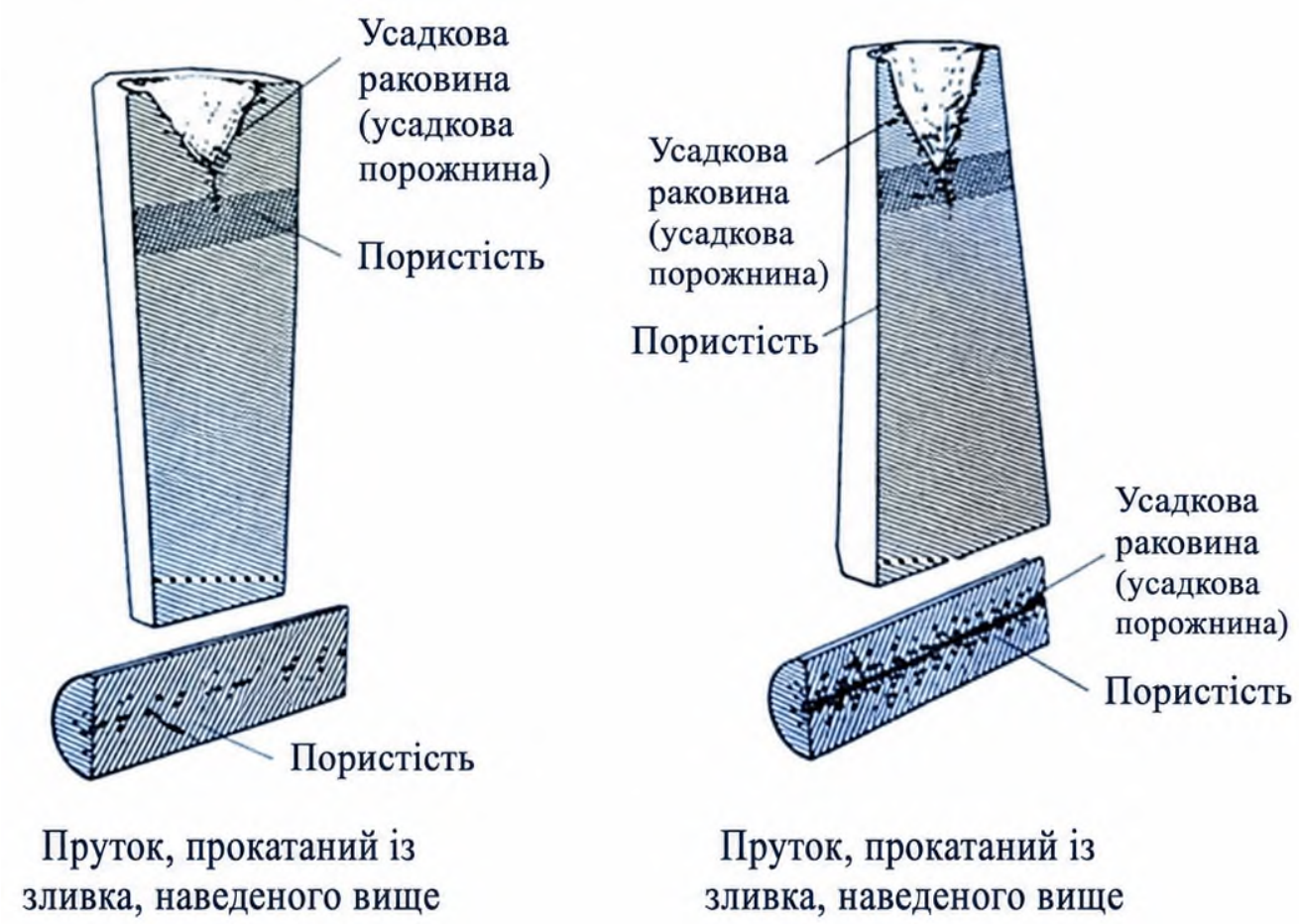


Рисунок 1.8 – Поздовжній розріз двох типів зливків, що показує типову усадкову раковину та пористість

1.2.2 Розливка металу на машинах безперервного лиття заготовок

Безперервна розливка металу здійснюється на машинах безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), де кристализація металу відбувається у процесі безперервного витягування заготовки з кристалізатора.

Основні види МБЛЗ класифікують за конструктивними та технологічними ознаками.

За формою отримуваних заготовок розрізняють на (рис. 1.9):

– слябові МБЛЗ (для виробництва плоских заготовок – слябів);

– блюмові МБЛЗ (для квадратних і прямокутних заготовок великого перерізу);

– сортові МБЛЗ (для отримання заготовок малого перерізу круглого або квадратного профілю).

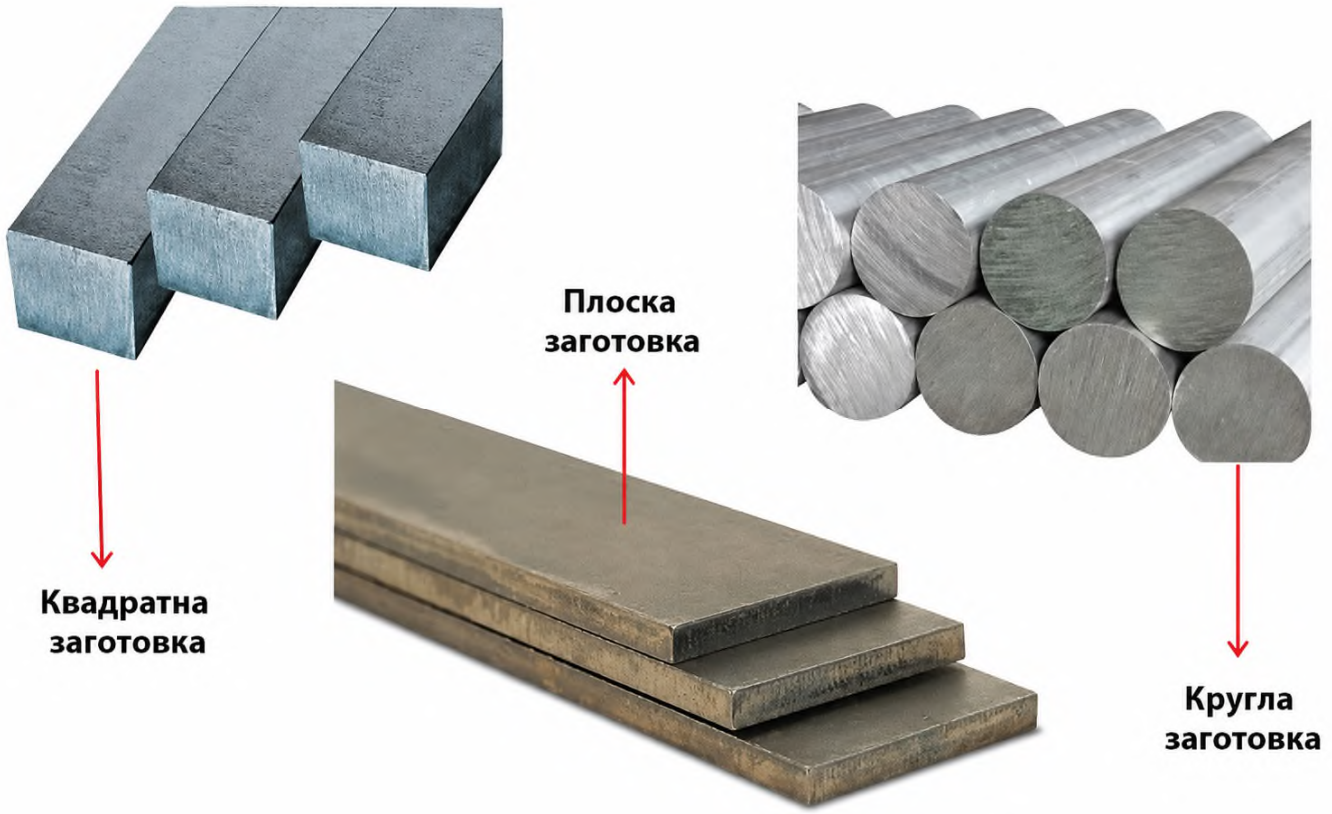


Рисунок 1.9 – Різні форми заготовок

Окремо виділяють комбіновані МБЛЗ, які дозволяють виробляти декілька типів заготовок на одній установці.

За кількістю струмків (руч'їв) МБЛЗ поділяють на одноручйові та багаторучйові установки, де багаторучйові системи забезпечують значне підвищення продуктивності сталеплавильного цеху.

За ступенем механізації та автоматизації розрізняють традиційні та високотехнологічні автоматизовані МБЛЗ, оснащені системами автоматичного регулювання швидкості витягування, рівня металу в кристалізаторі та

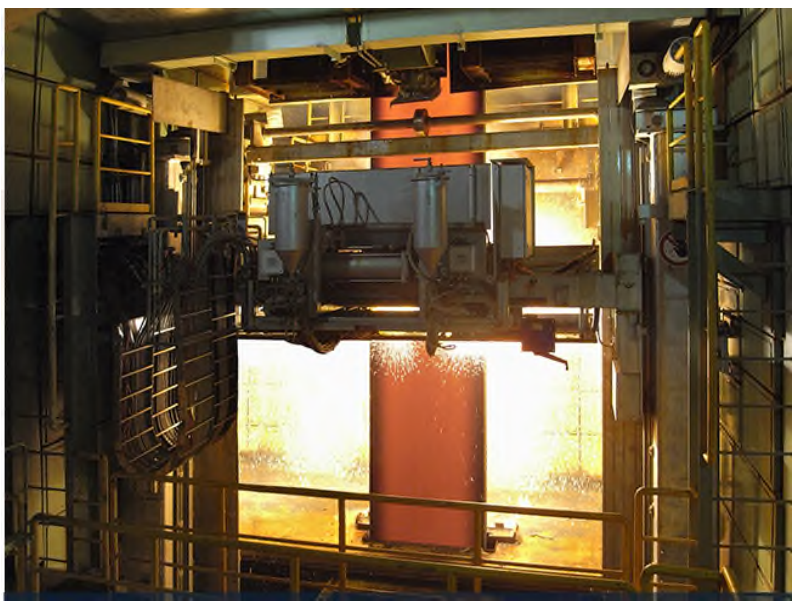
вторинного охолодження.

За способом розливки в МБЛЗ виділяють установки з вертикальним, вертикально-зігнутим (радіальним), криволінійним) та горизонтальним напрямом кристалізації заготовки (рис. 1.10).

Найбільш поширеними у сучасній металургії є радіальні та криволінійні МБЛЗ, які забезпечують компактність обладнання та високу продуктивність.

1.2.2.1 Розливка металу на МБЛЗ вертикального типу

Розливка на МБЛЗ вертикального типу (рис. 1.11) має свої особливості, зумовлені геометрією установки та умовами твердіння заготовки. Основною з них є забезпечення повного або майже повного затвердіння металу під час його руху вниз у вертикальному напрямку. Це потребує значної висоти установки, яка залежно від конструкції та призначення становить приблизно 15–30 м, а для машин великого перерізу може досягати 40–50 м і більше. У ряді випадків фундамент виконується у вигляді опускного колодязя глибиною до 30 м, що суттєво ускладнює будівництво цеху.



а



б

Рисунок 1.11 – Порізка сляба (*а*) та підйом сляба (*б*) на вертикальній МБЛЗ

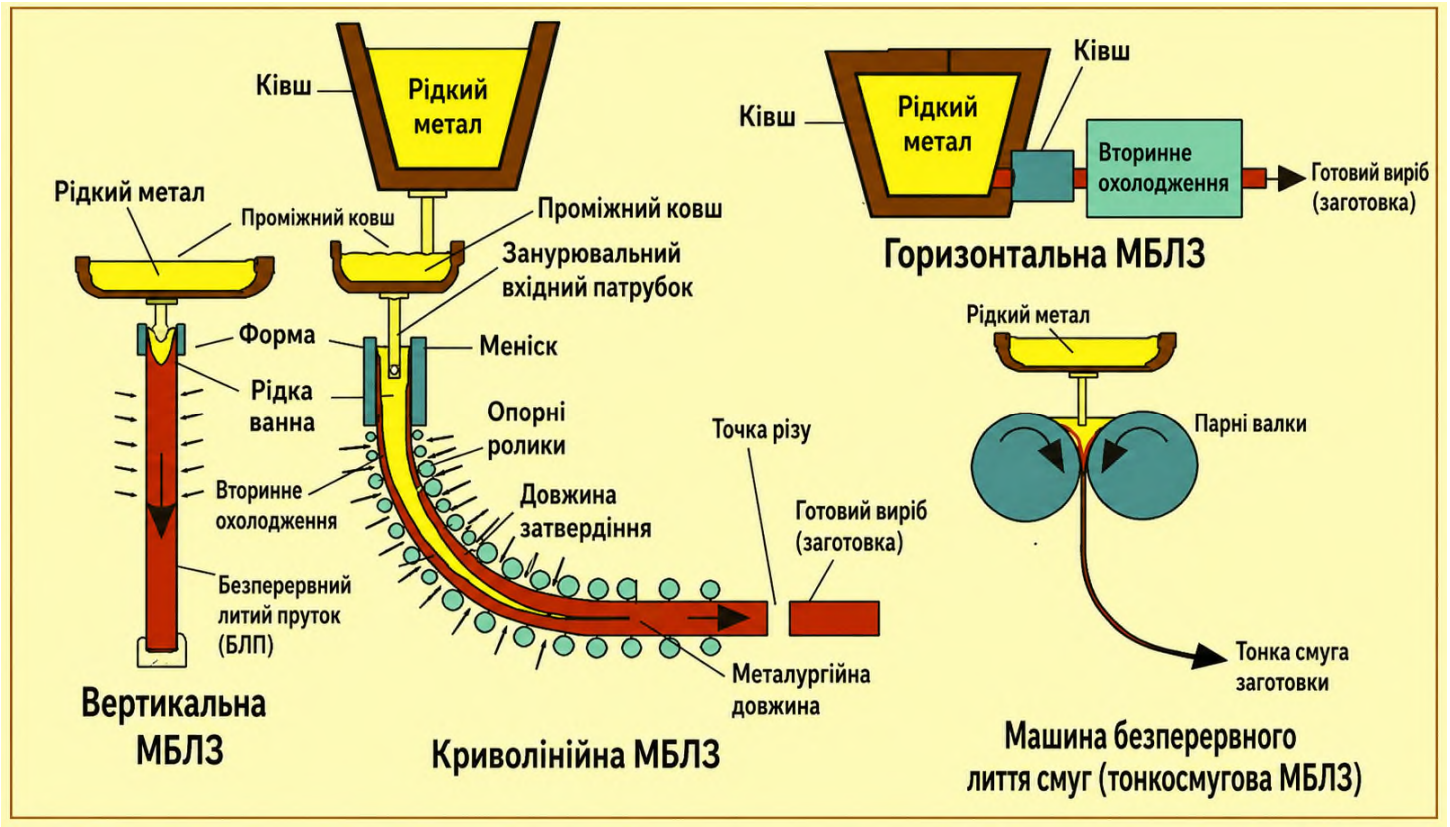


Рисунок 1.10 – Основні типи МБЛЗ

У процесі розливки заготовка формується в кристалізаторі, після чого переміщується вниз через зону вторинного охолодження, де завершується процес її кристалізації. Завдяки вертикальному розташуванню технологічної осі створюються сприятливі умови для спливання неметалевих включень, що позитивно впливає на якість готового металу.

Водночас така схема має певні обмеження. Через необхідність забезпечення повного тверднення швидкість розливки є відносно невеликою і зазвичай становить близько 0,3–0,6 м/хв, а для менших перерізів може підвищуватися до приблизно 1,0 м/хв. Зі збільшенням швидкості виникає ризик неповного затвердіння та прориву рідкого металу.

Крім того, вертикальні МБЛЗ характеризуються низькою гнучкістю щодо підвищення продуктивності та обмеженими можливостями інтеграції з прокатними станами в єдиний безперервний технологічний процес.

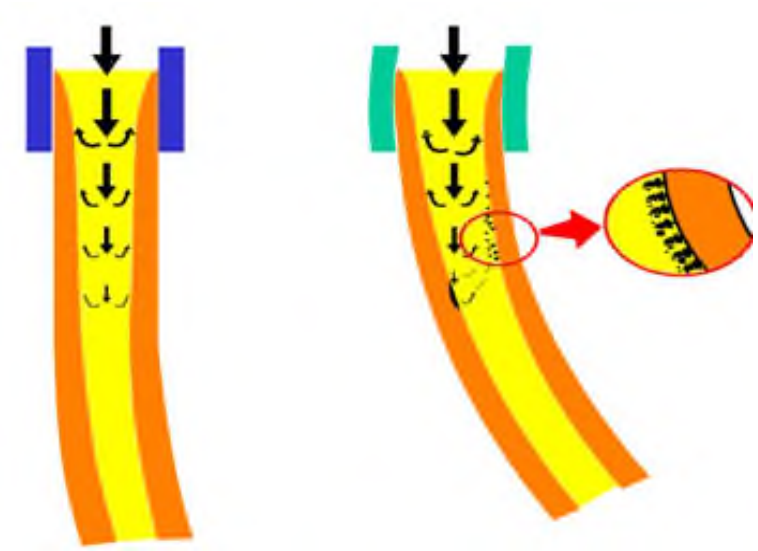
1.2.2.2 Розливка металу на МБЛЗ радіального типу

Розливка на МБЛЗ радіального типу (рис. 1.12) характеризується рядом специфічних особливостей, які зумовлені конструктивними параметрами установки та умовами кристалізації заготовки. Основною з них є те, що кристалізація та переміщення заготовки відбуваються по дузі постійного радіуса практично до повного затвердіння металу. Це забезпечує більш компактну компоновку обладнання порівняно з вертикальними установками та зменшує загальну висоту цеху.

У процесі розливки рідка сталь надходить у кристалізатор, де починається формування твердої оболонки заготовки. Далі заготовка поступово рухається по радіальній траєкторії через зону вторинного охолодження, де відбувається інтенсивне та контрольоване тверднення. Завдяки постійній кривизні траєкторії забезпечується відносно стабільний тепловий та механічний режим, що позитивно впливає на якість поверхні та внутрішню будову металу.

Водночас радіальні МБЛЗ мають певні конструктивні обмеження. Із

збільшенням перерізу заготовки зростають радіус машини та її габарити, що призводить до збільшення довжини технологічної лінії та частково нівелює переваги компактності. Крім того, такі машини потребують високої точності налаштування роликових секцій та системи вторинного охолодження для запобігання дефектам твердої оболонки.



а *б*

Рисунок 1.12 – Схема умов формування заготовки в вертикальному (*а*) і радіальному кристалізаторах (*б*)

Швидкість розливки на радіальних МБЛЗ залежить від перерізу заготовки та марки сталі і зазвичай становить приблизно 0,8–2,0 м/хв, а для сортових заготовок невеликого перерізу може досягати 3,0–4,0 м/хв.

1.2.2.3 Розливка металу на МБЛЗ криволінійного типу

Розливка металу на МБЛЗ криволінійного типу (рис. 1.13) характеризується поєднанням вертикальної та криволінійної ділянок руху заготовки, що забезпечує раціональні умови її формування та твердннення. Рідка сталь із сталерозливного ковша надходить у кристалізатор, де починається утворення твердої оболонки заготовки. Далі напівзатверділа заготовка проходить коротку вертикальну ділянку, після чого поступово згинається по

заданому радіусу та переміщується через зону вторинного охолодження.

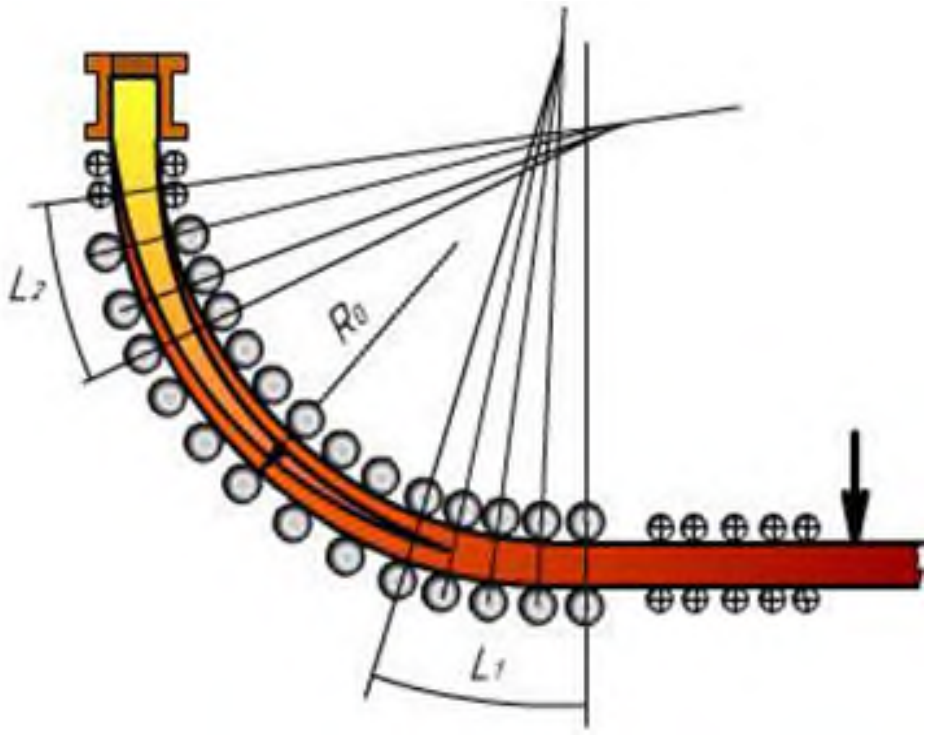


Рисунок 1.13 – Схема МБЛЗ криволінійного типу (L_1 – ділянка розгинання заготовки; L_2 – ділянка загину заготовки; R_o – базовий радіус МБЛЗ)

Така конструкція дозволяє забезпечити сприятливі умови для початкового етапу кристалізації, зокрема сприяє спливанню неметалевих включень та зниженню дефектності металу. Поетапний вигин заготовки зменшує механічні напруження в твердіючій оболонці та знижує ризик утворення тріщин і проривів.

У процесі подальшого руху заготовка проходить через роликові секції, де відбувається інтенсивне вторинне охолодження та завершення кристалізації. Після повного затвердіння заготовка випрямляється та подається на різання на мірні довжини.

Зазвичай швидкість розливки на криволінійних МБЛЗ становить приблизно 1,0–3,0 м/хв для слябових заготовок середнього перерізу. Для тонких слябів і сортових заготовок невеликого перерізу швидкість може підвищуватися до 4–6 м/хв, а в окремих сучасних високопродуктивних установках – навіть вище за умови стабільного процесу кристалізації та ефективного охолодження.

МБЛЗ криволінійного типу широко застосовуються у високопродуктивних цехах, оскільки поєднують високу якість заготовок із компактністю обладнання та можливістю інтеграції в безперервні технологічні лінії.

1.2.2.4 Розливка металу на МБЛЗ горизонтального типу

Розливка металу на МБЛЗ горизонтального типу (рис. 1.14) характеризується тим, що технологічна вісь установки розташована горизонтально або під невеликим кутом до горизонту. Рідка сталь зі сталерозливного ковша надходить у металоприймач, звідки через герметично з'єднаний кристалізатор починається формування та часткове тверднення заготовки. Далі напівзатверділий метал переміщується горизонтально через зону вторинного охолодження, де завершується процес кристалізації.

Особливістю таких МБЛЗ є застосування періодичного витягування заготовки, коли вона подається вперед невеликими порціями (зазвичай 20–50 мм), після чого механізм повертається у вихідне положення. Під час зворотного руху заготовка залишається нерухомою або незначно осаджується назад. Такий режим роботи замінює хитання кристалізатора, яке використовується в інших типах машин, і забезпечує стабільне формування твердої оболонки.

У процесі подальшого руху заготовка проходить роликову систему вторинного охолодження, де відбувається інтенсивне відведення тепла та повне затвердіння металу. Після цього заготовка надходить до пристрою різання, де розрізається на мірні довжини, і далі транспортується на складування або до прокатного відділення.

Швидкість розливки на МБЛЗ горизонтального типу є відносно невисокою порівняно з криволінійними та радіальними машинами, що зумовлено особливостями тепловідведення та періодичним режимом витягування заготовки.

Зазвичай швидкість розливки становить приблизно 0,5–2,0 м/хв для

сортових заготовок невеликого перерізу. В окремих випадках, за стабільних технологічних умов та ефективного вторинного охолодження, вона може наближатися до 2,5–3,0 м/хв, але такі значення застосовуються рідше.

Обмеження швидкості пов’язане з необхідністю забезпечення достатньої товщини твердої оболонки та запобіганням її руйнуванню під час періодичного витягування заготовки.

Горизонтальні МБЛЗ переважно використовуються для лиття сортових заготовок невеликого перерізу, оскільки така конструкція забезпечує компактність обладнання, менші капітальні витрати та спрощене будівництво цеху, однак має обмеження щодо продуктивності та розмірів заготовок у порівнянні з вертикальними та криволінійними установками.



Рисунок 1.14 – Загальний вигляд МБЛЗ горизонтального типу

1.2.3 Способи розливки феросплавів

Способи розливки феросплавів залежать від їх хімічного складу, температури плавлення, в’язкості розплаву та вимог до якості готової продукції. У промисловості застосовують кілька основних методів, кожен з яких має свої технологічні особливості:

1. Розливка у виливниці (отримання зливків)

Найпоширеніший спосіб, при якому рідкий феросплав із ковша

розливають у металеві або піщані форми. Після охолодження утворюються зливки заданої маси та форми. Метод відзначається простотою реалізації та широко застосовується для більшості феросплавів, зокрема феромарганцю (FeMn), феросиліцію (FeSi) та ферохрому (FeCr).

2. Розливка на розливних машинах конвеєрного типу

У цьому випадку розплав безперервно подається у форми, що рухаються конвеєром. Після затвердіння зливки автоматично вивантажуються. Такий спосіб застосовується переважно для феросиліцію (FeSi з вмістом кремнію 45–75%), а також для окремих марок феромарганцю, де важлива стабільність розмірів та полегшення механізованої обробки.

3. Розливка у грануляційні установки

Рідкий феросплав подається тонким струменем або розпилюється у воді, де швидко охолоджується з утворенням гранул. Найчастіше цей спосіб застосовується для феросиліцію (особливо FeSi з вмістом кремнію 65–75%), кремнієвмісних феросплавів, а також для частини ферохрому, коли потрібна дрібна фракція для легування сталі.

4. Відливка у пісок або шлакові форми

Застосовується для окремих видів феросплавів, коли не висуваються високі вимоги до точності форми. Використовується для феромарганцю середнього та низьковуглецевого, а також для деяких видів феросиліцію технічних марок, де допустима грубіша структура зливка.

5. Безперервна розливка

Безперервна розливка феросплавів застосовується обмежено і лише для окремих марок, які мають задовільні ливарні властивості та стабільну кристалізацію. У промисловій практиці її іноді використовують для феросиліцію спеціальних марок та окремих стабільних складів феромарганцю, однак через крихкість і складність кристалізації більшість феросплавів (зокрема високовуглецевий ферохром) цим способом не розливають.

Розливні машини (рис. 1.15) застосовуються на металургійних підприємствах для розливки феросплавів (феросилікомарганцю, ферохрому,

феросиліцію, феронікелю, титанових шлаків тощо) із ковшів у виливниці, подальшого охолодження чушок і їх завантаження у залізничні вагони.

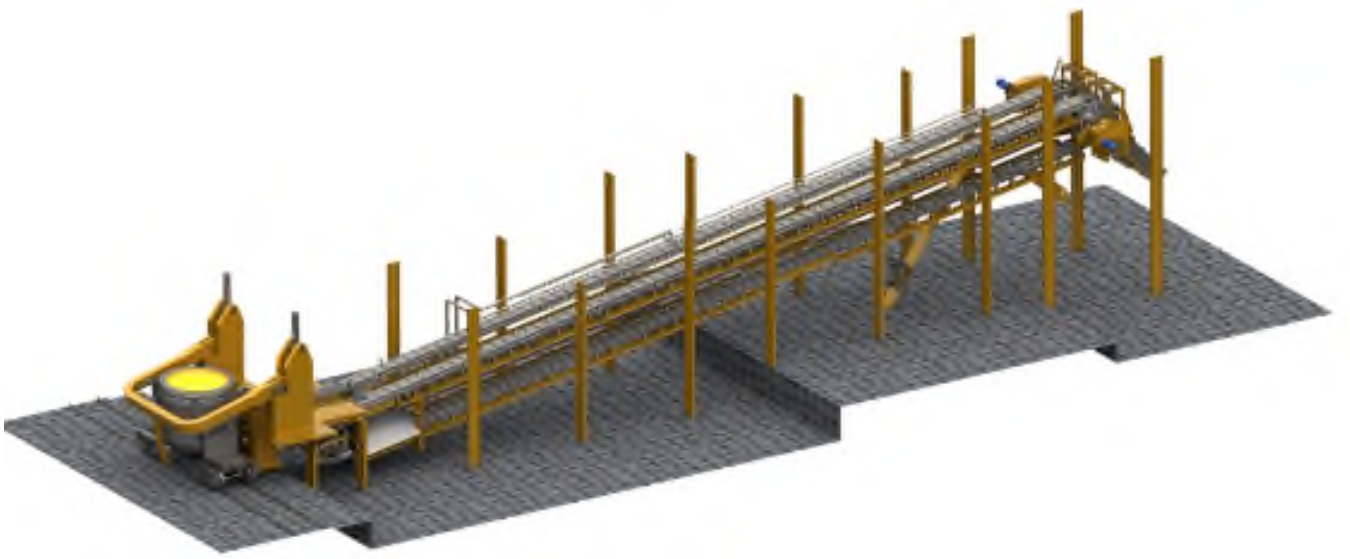


Рисунок 1.15 – Розливна машина для феросплавів

Залежно від вимог до готової продукції виливниці можуть мати різну кількість місць для заливання та забезпечувати отримання чушок різної маси. Особливості розливної машини наступні:

– конструкція машини може бути одно- або дволанцюговою (двохстрічковою) залежно від необхідної продуктивності;

– основні елементи ланцюга конвеєра, які зазнають тертя під час роботи, виготовляються з зносостійкої сталі;

– машина має дві зони водяного охолодження;

– до складу машини входить вузол підготовки та нанесення антипригарного покриття, що запобігає прилипанню металу до виливниць;

– у конструкції відсутня необхідність спорудження будівельної частини для кантовальної лебідки;

– зміна швидкості руху конвеєра здійснюється за допомогою частотного регулювання електроприводу;

– для розливки феросплавів у виливниці дволанцюгової машини використовується жолоб із розгалуженням на два носики, що забезпечує

рівномірний розподіл металу;

– забезпечується однакова інтенсивність зливання феросплавів при різних кутах нахилу ковша;

– розливка феросплавів здійснюється за допомогою гідравлічного кантова теля.

1.2.4 Способи розливки кольорових металів та сплавів

Способи розливки кольорових металів і сплавів залежать від їх фізико-хімічних властивостей (температури плавлення, окиснюваності, в'язкості), вимог до якості продукції та подальшого використання. У промисловості застосовують кілька основних методів.

1. Розливка у виливниці (чушкова розливка)

Це найпоширеніший спосіб, при якому розплав кольорового металу (алюмінію, міді, свинцю, цинку та їх сплавів) розливають у металеві або чавунні форми. Після охолодження отримують зливки (чушки) заданої маси. Метод простий, надійний і широко застосовується у виробництві первинних і вторинних металів.

2. Безперервна розливка

Застосовується для алюмінію, міді та деяких їх сплавів. Розплав безперервно кристалізується в кристалізаторі з утворенням злитків, стрічок або заготовок. Метод забезпечує високу продуктивність, однорідну структуру металу та мінімальні втрати.

3. Напівбезперервна розливка

Використовується переважно для алюмінію та магнієвих сплавів. Розплав заливають у кристалізатор, а злиток поступово витягується вниз (або вгору), де твердне. Після досягнення заданої довжини процес зупиняють.

4. Розливка у піщані та кокільні форми

Застосовується для складних деталей і невеликих серій. Піщані форми використовують для великих або простих заготовок, а кокільні (металеві) – для

отримання більш точних і якісних виливків із кращою структурою.

5. Розливка під тиском (лиття під тиском)

Розплав подається у металеву форму під високим тиском. Цей метод широко використовується для алюмінієвих, цинкових і магнієвих сплавів, особливо в автомобільній та машинобудівній промисловості. Забезпечує високу точність і чисту поверхню виробів.

6. Відцентрова розливка

Рідкий метал заливається у форму, що обертається. Під дією відцентрових сил відбувається формування щільної структури без пор і дефектів. Метод застосовується для труб, втулок і циліндричних виробів.

7. Грануляційна розливка

Розплав швидко охолоджується у воді або газовому середовищі з утворенням гранул. Використовується для спеціальних сплавів і подальшого легування.

Розливна машина РМ-64 (рис. 1.16) призначена для розливки кольорових металів із печей місткістю до 3000 кг. Машина складається з рами, виготовленої зі сталевого прокату та профільних труб, приводного і натяжного валів, з'єднаних катковим ланцюгом, ударного механізму, пульта керування, суміщеного з силовою шафою, та педалі пуску–зупинки.

До складу приводу входять мотор-редуктор із частотним регулюванням двигуна, ланцюгова передача та командний апарат із диском і двома індуктивними датчиками. Розливний ківш із вкладишем із жаростійкого бетону може працювати як в автоматичному, так і в ручному режимі.

При роботі в ручному режимі зупинку виливниць під розливання забезпечує датчик, а безпосереднє розливання та запуск конвеєра здійснює оператор. Ударний механізм із двома молотками-дисками приводиться в дію взводною зірочкою.

Виливниці кріпляться на полицях ланцюгів двома високоміцними болтами через кожні 200 мм. Заміна виливниць двома слюсарями з використанням механізованого інструменту виконується приблизно за 8 год.

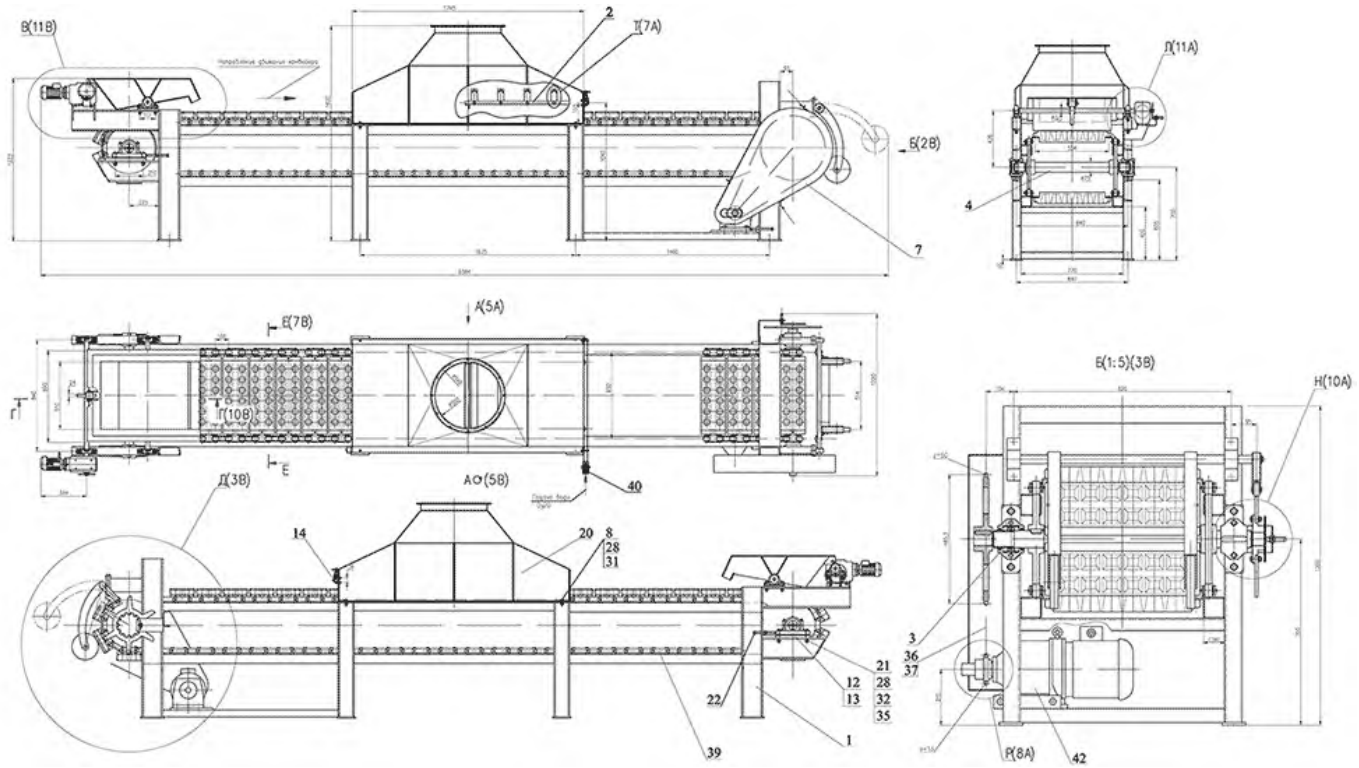


Рисунок 1.16 – Схема розливної машини РМ-64

Розливна машина РМ-64 має такі технічні характеристики:

1. Рух виливниць може бути безперервним або переривчастим. Кількість виливниць становить 64 шт. В одній виливниці формується 1 чушка, або до 20 пірамідок чи конусів залежно від конфігурації.

2. Матеріал виливниць – сірий чавун марки СЧ20. Привід конвеєра виконаний на основі мотор-редуктора BONFIGLIOLI або українського виробництва.

3. Висота краю розливного ковша від рівня підлоги становить 1060 мм, а висота тари в зоні розвантаження – 1000 мм.

4. Продуктивність розливання чушки масою 15 кг становить до 3 т/год. При напівавтоматичному розливанні у пірамідки продуктивність досягає до 1,6 т/год.

5. Габаритні розміри конвеєра: довжина – 6600 мм, ширина – 1500 мм, висота (без системи охолодження та коліс) – 1870 мм.

6. Маса установки разом із виливницями становить 6 т. Нормативний термін служби при двох капітальних ремонтах – 10 років.

1.3 Дефекти поверхні сталевого зливка

Дефекти сталевих зливків поділяють на дві основні групи:

– природні (неминучі) (формуються під час кристалізації та охолодження металу і включають усадкову раковину, осьову рихлість, пористість, хімічну й структурну неоднорідність, газові пори та ендогенні неметалеві включення).

– технологічні (виникають через порушення режимів виплавки та розливки сталі або недосконаліть обладнання і технології. До них належать тріщини різного типу, поверхневі дефекти (плени, «пояси»), заворот кірки, підкіркові газові бульбашки, рослість зливків киплячої сталі, а також «халява» та інші відхилення форми й структури зливка).

Слід зазначити, що якість поверхні зливка значною мірою залежить від стану внутрішньої поверхні виливниць. Недостатнє очищення або неправильне

змащування сприяє утворенню підкіркових бульбашок і поверхневих тріщин, а також прискорює зношування виливниць.

Усадкова раковина (рис. 1.17), що проникає в тіло зливка, знижує його механічні властивості, а при подальшій деформації може викликати розшарування металу. Якщо ж вона заварюється під час гарячої обробки, її негативний вплив зменшується. Поверхня відкритої раковини є окисненою та нерівною, тоді як закрита має гладку кристалічну будову.



Рисунок 1.17 – Усадкова раковина на зламі

Зональна ліквація (рис. 1.18) та інші структурні неоднорідності виникають через кристалізацію сплавів у температурному інтервалі, що зумовлює нерівномірний розподіл компонентів по перерізу зливка. Також характерними дефектами є осьова пухкість та заворот кірки, які формуються внаслідок порушень процесу затвердіння.

Неметалеві включення можуть мати ендогенне або екзогенне походження: перші утворюються в процесі плавки та кристалізації, другі – потрапляють у метал ззовні через шлак, вогнетриви або забруднене обладнання.

До технологічних дефектів також належать тріщини, які виникають при нерівномірному охолодженні, надмірній температурі розливки або порушенні мастила виливниць, а також поверхневі дефекти, пов’язані з перериванням струменя металу чи його надмірною газонасиченістю.



Рисунок 1.18 – Зональна ліквація

На рис. 1.19 показано характерний розподіл хімічної неоднорідності у сталевому зливку.У верхній частині зливка спостерігається гаряча верхня сегрегація, яка формується внаслідок переміщення легкоплавких компонентів під час кристалізації. У центральній зоні відображені А- та V-сегрегації, що мають вигляд осьових та V-подібних смуг і виникають через конвективні потоки та спрямоване твердіння. У нижній частині зливка показано негативну сегрегацію, яка характеризується зниженим вмістом домішок через раннє затвердіння металу.

На рис. 1.20 представлено комплексне металографічне дослідження литої структури металевого зливка, що поєднує його макро- та мікроструктуру. На поздовжньому розрізі зливка чітко виділяється усадкова раковина у верхній частині, а також зони хімічної неоднорідності у вигляді центральної V-подібної та периферійної А-подібної ліквації. Безпосередньо біля холодної стінки форми через максимальну швидкість охолодження формується кірковий шар, що складається з дрібних первинних дендритів. У середній зоні зливка, де тепло відводиться в одному напрямку, кристали витягуються, утворюючи грубі стовпчасті дендрити з розвиненими вторинними осями. Ближче до осердя, в умовах уповільненого охолодження, елементи структури розростаються ще

сильніше і перетворюються на дуже грубі дендрити. У самому центрі зливка спрямований тепловідовід припиняється, що призводить до формування рівноважної хаотичної зони з однаковим розростанням кристалів у всіх напрямках.

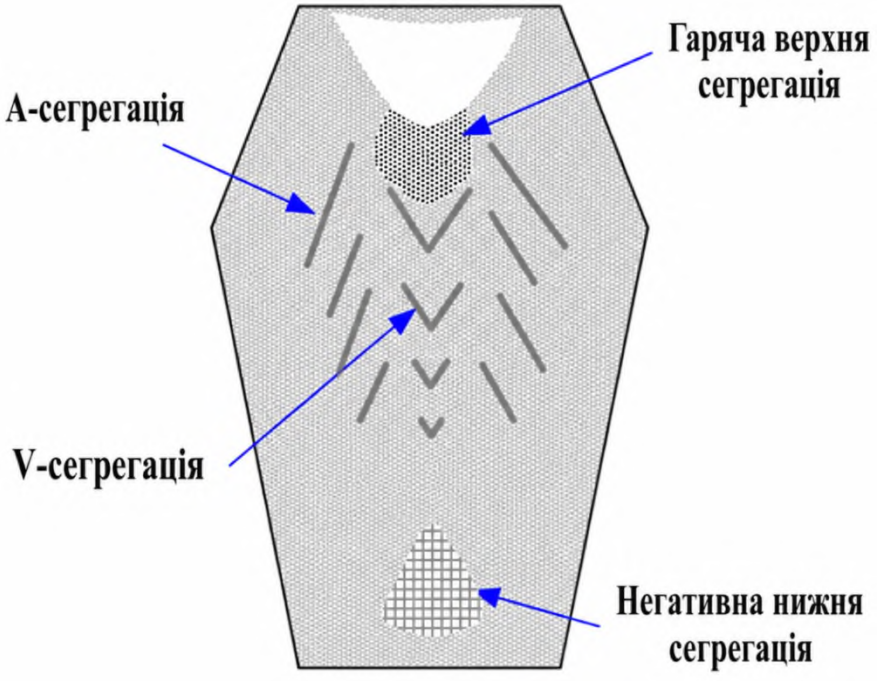


Рисунок 1.19 – Сегрегація зливу металу

Поверхневі дефекти металевих заготовок – це порушення суцільності або якості зовнішнього шару металу, які виникають під час розливки, кристалізації, прокатування або подальшої обробки. Вони є важливим показником якості металопродукції, оскільки безпосередньо впливають на її міцність, довговічність та придатність до подальшого використання.

Такі дефекти можуть утворюватися через порушення технологічних режимів охолодження, недостатній захист розплавленого металу від окиснення, механічні пошкодження заготовок під час транспортування або обробки, а також через наявність неметалевих включень. Важливу роль відіграє також нестабільність параметрів розливки та нерівномірність кристалізації.

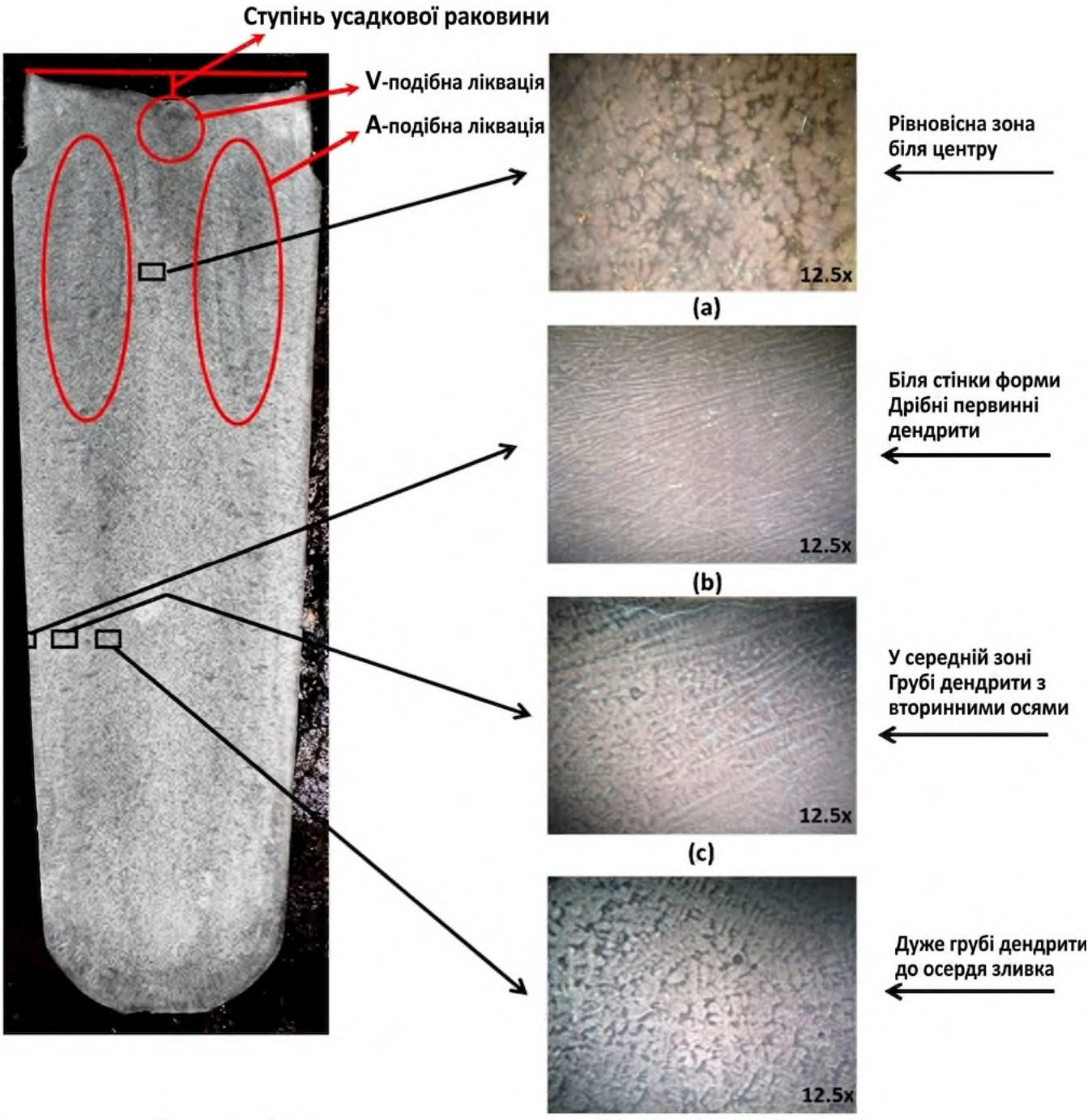


Рисунок 1.20 – Макро-та мікроструктура зливка металу

До основних поверхневих дефектів відносять поздовжні та поперечні тріщини, які виникають через термічні напруження та нерівномірне охолодження металу. Також часто зустрічаються заливини, які утворюються внаслідок надлишкового або нестабільного надходження металу під час розливки. Поверхня заготовок може мати раковини та шорсткість, що пов’язані з газовиділенням і усадковими процесами. Окремо виділяють дефекти у вигляді

кілець або смуг, які з’являються через коливання умов кристалізації.

Наявність поверхневих дефектів негативно впливає на якість продукції: знижує механічні властивості, погіршує корозійну стійкість і ускладнює подальшу механічну та термічну обробку. Тому контроль технологічних процесів на всіх етапах виробництва є ключовим фактором для запобігання їх утворенню.

1.4 Дефекти поверхні безперервнолитих заготовок

До основних поверхневих дефектів безперервнолитої заготовки належать: поздовжні тріщини (по ребрах і гранях), поперечні тріщини, «пояс», заворот кірки, залівіни, шлакові включення, газові бульбашки, а також прориви твердіючої кірки та інші подібні порушення суцільності поверхні.

Поздовжні тріщини (рис. 1.21) являють собою розриви металу, що простягаються вздовж поверхні заготовки. Їх поява зумовлена внутрішніми напруженнями, які формуються під час кристалізації, а також зниженою міцністю і пластичністю сталі в окремих температурних інтервалах. Такі тріщини можуть виникати як у кутових зонах, так і на гранях заготовки, іноді маючи вигляд тонких, ледь помітних розривів або ж глибоких дефектів. Їх розвиток значною мірою залежить від геометрії кристалізатора, зокрема від радіуса закруглення його кутів.

Поперечні тріщини (рис. 1.22) розташовуються перпендикулярно до напрямку розливки і можуть спостерігатися як на гранях, так і в кутових ділянках заготовки. Основними причинами їх утворення є порушення умов роботи кристалізатора: надмірне тертя, недостатнє змащування, неправильна центровка, а також нестабільність режиму його коливань. Додатково дефект може виникати при розгинанні заготовки, якщо вона недостатньо нагріта і перебуває поза зоною пластичної деформації.



а



б

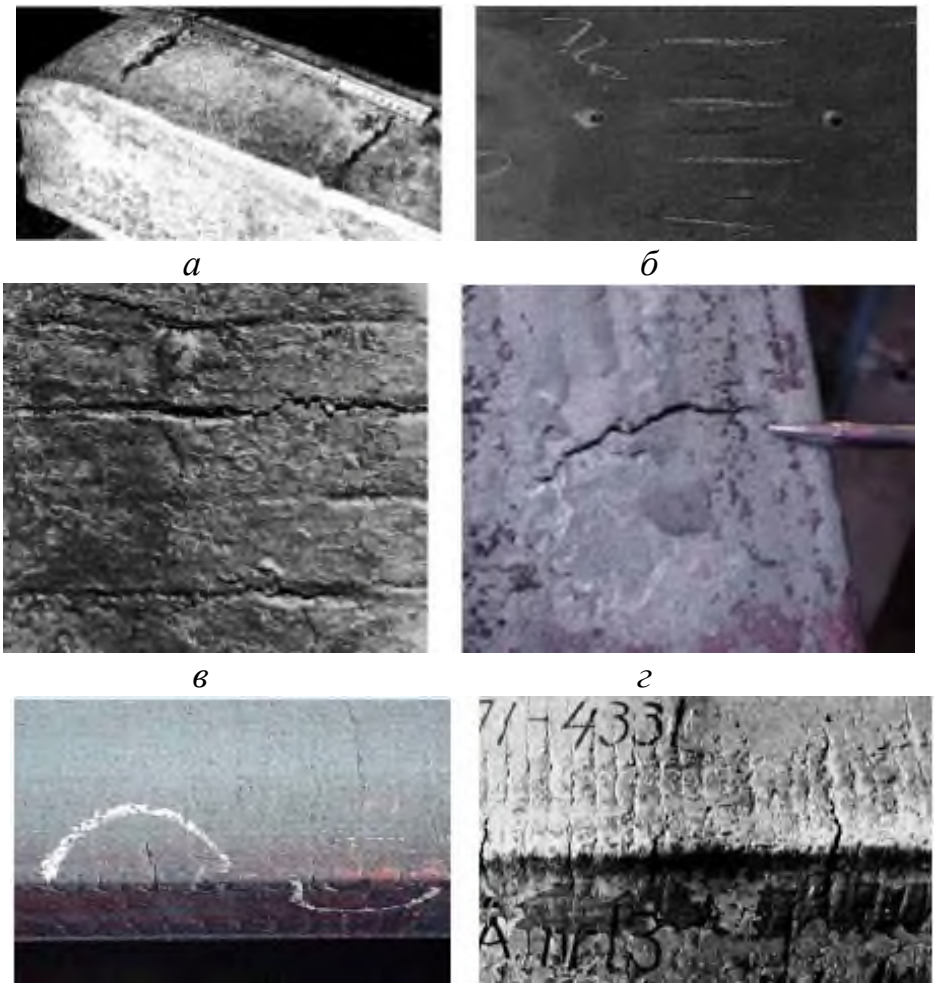
а – білякутові; б – посередині широкої грані сляба

Рисунок 1.21 – Поздовжні поверхневі тріщини

«Пояс» (рис. 1.23) є чітко вираженим технологічним дефектом, що охоплює практично весь периметр заготовки. Він формується внаслідок зупинок або різкого зниження швидкості розливки, що призводить до окиснення затверділої кірки. У місці відновлення процесу утворюється характерна кільцеподібна зона ослаблення, яка суттєво знижує якість металу і часто не підлягає усуненню без вирізання дефектної ділянки.

Заворот кірки виникає у випадках, коли окиснені частини твердої кірки потрапляють на поверхню заготовки з меніска. Найчастіше це спостерігається при нестабільному режимі розливки, використанні металу з низькою рідкотекучістю або при наявності легкозаймистих домішок.

Залівіни (рис. 1.24) утворюються через проникнення рідкого металу в зазор між кристалізуючою кіркою і стінкою кристалізатора. Причинами є коливання рівня металу, недостатнє змащування, порушення роботи обладнання та нерівномірний тепловий режим. Даний дефект часто супроводжується викривленням поверхні заготовки.



а *б* *в* *г* *д* *е*

Рисунок 1.22 – Поперечні поверхневі тріщини на межі сортової заготовки (*а*, *б*) і сляба (*в*, *г*), а також на кутових ділянках (*д*, *е*)



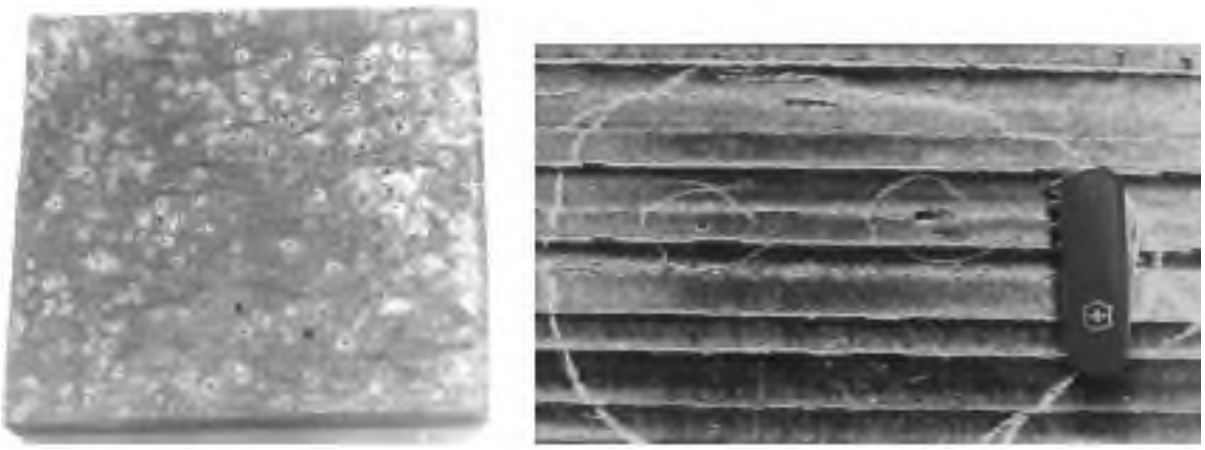
Рисунок 1.23 – «Пояс» на поверхні заготовки



а *б* *в*

Рисунок 1.24 – Поздовжній перетин зразка заготовки в місці розташування залівін (а) та її фото на поверхні заготовок (*б*, *в*)

Газові бульбашки (рис.1.25) проявляються у вигляді поодиноких або групових порожнин на поверхні. Їх утворення пов’язане з виділенням газів під час кристалізації сталі, а також із наявністю вологи у шлакоутворюючих матеріалах чи недостатнім розкисленням металу. Цей дефект негативно впливає на суцільність поверхні і може спричиняти подальші руйнування при деформації.

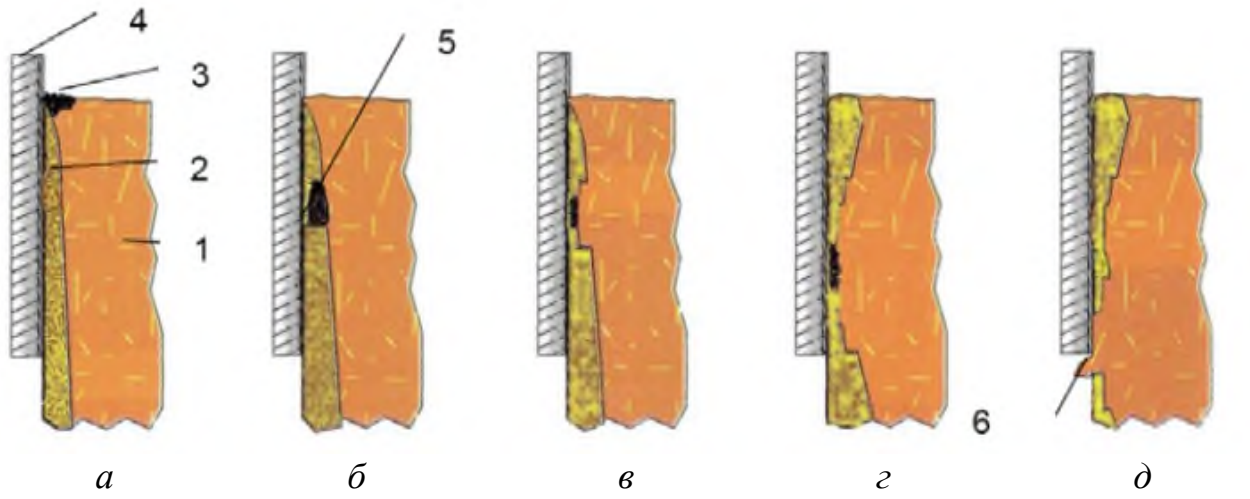


а *б*

Рисунок 1.25 – Бульбашки і пори на поверхні безперервнолитої сортової заготовки (*а*) та сляба (*б*)

Прориви твердіючої кірки (рис. 1.26) є одним із найнебезпечніших

дефектів безперервного лиття. Вони виникають, коли рідкий метал прориває крізь недостатньо міцну оболонку заготовки. Причинами можуть бути порушення теплового режиму, наявність шлакових включень, нестабільна робота кристалізатора або дефекти початкового етапу розливки.



1 – рідкий метал; *2* – кірка металу; *3* – конгломератне включення на меніску металу; *4* – кристалізатор; *5* – дефектна скоринка з оксидним конгломератом; *6* – прорив металу під кристалізатором на виході дефектної скоринки з кристалізатора.

Рисунок 1.26 – Схема утворення шлакового прориву через тверді включення на меніску металу

Шлакові включення являють собою неметалеві домішки, які потрапляють у поверхню або тіло заготовки. Вони виникають через ерозію футеровки, затягування шлаку або вторинне окиснення металу. Такі включення суттєво знижують чистоту сталі та можуть стати причиною внутрішніх і поверхневих дефектів у готовому прокаті.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗЛИВКИ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ

2.1 Досвід України в розливці сталей та сплавів

Металургійна промисловість України має значний досвід у сфері розливки сталі та сплавів, який формувався переважно на базі традиційної розливки у виливниці з поступовим впровадженням технологій безперервного лиття заготовок на окремих підприємствах. Загальною тенденцією є модернізація сталеплавильного виробництва, спрямована на підвищення якості металу, зменшення втрат та підвищення енергоефективності.

На ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» впроваджено сучасну технологію розливки сталі на машинах безперервного лиття заготовок конвертерного цеху (рис. 2.1). У відділенні безперервного лиття сталі проведено дослідні випробування процесу розливки закритим струменем (стопорний спосіб розливки). До складу відділення входять установка позапічної обробки сталі типу «ківш-піч», а також шестиструменева сортова МБЛЗ продуктивністю 1,2 млн т/рік, призначена для виготовлення заготовок із вуглецевих, конструкційних і низьколегованих сталей.

На ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» активно впроваджуються та вдосконалюються технології безперервного лиття сталі (рис. 2.2). Зокрема, здійснюється модернізація проміжного ковша, підбір більш стійких вогнетривких матеріалів, а також застосування сучасних теплоізоляційних сумішей для захисту дзеркала металу в проміжному ковші. Підвищення продуктивності МБЛЗ досягається також за рахунок збільшення середньої швидкості витягування заготовки та розширення практики розливки за схемою «плавка на плавку», що дозволяє збільшити кількість плавок у безперервній серії. Дана технологія застосовується для розливання заготовок перетином 160×160 мм зі сталі марок С72D2 і С80D2, а також перетином 200×200 мм зі сталі марки S3355. Ці марки сталі обрані для пілотних розливок через їхню

високу затребуваність серед основних споживачів продукції.



Рисунок 2.1 – Розливка сталі на МБЛЗ конвертерного цеху в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

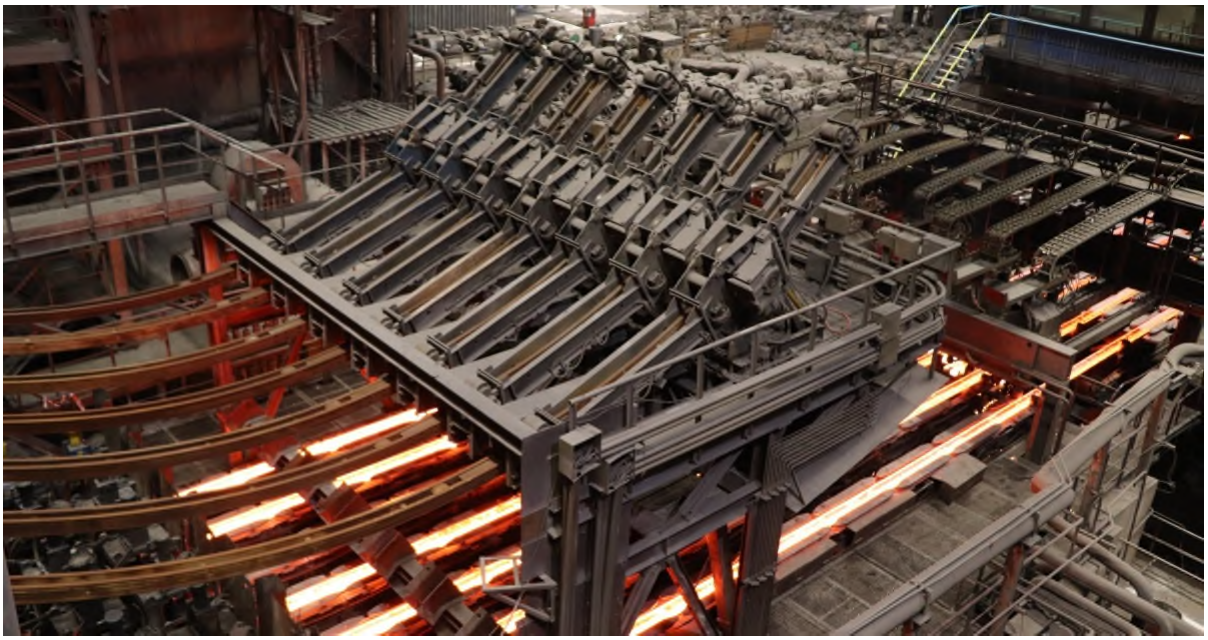


Рисунок 2.2 – Розливка сталі на МБЛЗ в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

В умовах «Інтерпайп сталь» сортамент продукції включає широкий спектр високоякісних марок сталі, які розливаються на машинах безперервного лиття блюмів МБЛЗ №1 та МБЛЗ №2 (рис. 2.3). При цьому МБЛЗ №1 є п’ятиструмковою установкою, а МБЛЗ №2 – чотириструмковою, що визначає їх різну продуктивність і технологічні можливості.

Обидві установки виконані за криволінійно-радіальною схемою з базовим радіусом 12 м, що забезпечує стабільні умови формування та кристалізації заготовки. Відстань між струмками становить 1500 мм для МБЛЗ №1 та 1800 мм для МБЛЗ №2, що зумовлено конструктивними особливостями агрегатів.

МБЛЗ №1 призначена для розливання круглих заготовок діаметром 150, 170, 210, 250 та 290 мм, тоді як МБЛЗ №2 використовується для заготовок більшого діаметра – 385, 410, 450 та 470 мм. Обидві машини працюють у серійному режимі з кількістю плавок у серії від 4 до 12.



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд криволінійно-радіальної МБЛЗ в умовах «Інтерпайп сталь»

Максимальна швидкість розливки суттєво відрізняється: для МБЛЗ №1 вона становить до 3,4 м/хв, тоді як для МБЛЗ №2 – до 0,68 м/хв, що обумовлено різницею у розмірах заготовок та умовах їх кристалізації. Довжина мірної заготовки становить 6–11,7 м для МБЛЗ №1 та 6,2–9,85 м для МБЛЗ №2.

Різання заготовок здійснюється методом газокисневого різання, що забезпечує точність геометрії та якість торців. Річна продуктивність становить близько 770 тис. т для МБЛЗ №1 та 550 тис. т для МБЛЗ №2, що свідчить про високу ефективність роботи обладнання.

Нажаль, в умовах ПАТ «Запоріжсталь» розливка сталі все ще здійснюється у виливниці (зокрема типу 4 «А», 1 «Б», 2 «Б», XV «Б», 1 «Д», 2 «Д» та 4 «Д») (рис. 2.4) , що є більш застарілим способом у порівнянні з безперервним литтям. Така технологія характеризується нижчою продуктивністю, підвищеними втратами металу та меншою стабільністю якості заготовок.



Рисунок 2.4 – Розливка сталі в умовах ПАТ «Запоріжсталь»

ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ) є одним із найбільших підприємств важкого машинобудування України та одним із провідних виробників металургійного обладнання. У сфері безперервного лиття сталі НКМЗ проєктує та виготовляє основні вузли машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), зокрема сегменти технологічної зони, правильно-тягові машини, роликові секції, механізми правки та витягування заготовки, а також інше допоміжне обладнання. Підприємство здійснює модернізацію діючих МБЛЗ і бере участь у створенні нових комплексів безперервного лиття (рис. 2.5 та рис. 2.6).



Рисунок 2.5 – Сортова МБЛЗ виробництва НКМЗ

Важливим напрямом діяльності НКМЗ є виготовлення обладнання не лише для українських металургійних комбінатів, а й для закордонних підприємств. Зокрема, завод виготовляв сегменти слябових МБЛЗ для металургійного комбінату Liberty Galați (Румунія), що підтверджує

конкурентоспроможність українського обладнання на міжнародному ринку.



Рисунок 2.6 – Машина безперервного лиття сортових заготовок виробництва НКМЗ

Завдяки значному науково-конструкторському потенціалу та власній виробничій базі НКМЗ залишається одним із небагатьох підприємств України,

здатних забезпечувати повний цикл проєктування та виготовлення складного металургійного обладнання для сучасних машин безперервного лиття заготовок. Продукція підприємства експортувалася до десятків країн світу, що свідчить про високий рівень технічних рішень і надійність обладнання.

Основна продукція НКМЗ для МБЛЗ:

– роликові секції та сегменти технологічної зони;
– правильно-тягові машини;
– механізми правки безперервнолитої заготовки;
– транспортні та роликові системи;
– обладнання вторинного охолодження;
– вузли модернізації діючих МБЛЗ.

2.2 Світові тенденції розвитку технологій розливки металів та перехід до безперервного лиття заготовок

Сучасний розвиток металургійної промисловості характеризується стійкою тенденцією до вдосконалення технологій розливки металів, підвищення їх енергоефективності, автоматизації процесів та покращення якості металопродукції. Основним напрямом трансформації сталеплавильного виробництва у світі є поступовий відхід від традиційної розливки у виливниці та широке впровадження технології безперервного лиття заготовок.

Перехід до безперервного лиття зумовлений низкою техніко-економічних переваг, серед яких підвищення виходу придатного металу, зменшення втрат при обрізці, скорочення енерговитрат, зниження трудомісткості та покращення макро- і мікроструктури заготовок. У сучасних умовах частка сталі, що розливається методом безперервного лиття, у провідних країнах світу перевищує 95–98%, що фактично свідчить про витіснення традиційної розливки у виливниці з масового виробництва.

Провідні металургійні компанії активно впроваджують високотехнологічні МБЛЗ із підвищеним рівнем автоматизації та цифрового

керування процесами. Зокрема, компанія ArcelorMittal (Люксембург) використовує сучасні криволінійні та вертикально-зігнуті МБЛЗ на більшості своїх комбінатів у Європі та США. Компанія Tata Steel (Індія, Велика Британія) реалізує комплексні програми модернізації сталеплавильного виробництва з повним переходом на безперервне лиття. У Японії підприємства Nippon Steel Corporation і JFE Steel досягли одного з найвищих у світі рівнів автоматизації МБЛЗ, забезпечуючи стабільну якість безперервнолитих заготовок для автомобільної та машинобудівної промисловості.

У Китаї, який є найбільшим виробником сталі у світі, компанії Baowu Steel Group та HBIS Group масово впроваджують багаторучйові МБЛЗ великої продуктивності, що дозволяє ефективно забезпечувати внутрішній ринок і експорт. В Європі компанія ThyssenKrupp Steel Europe активно застосовує високоточні системи керування процесом кристалізації та вторинного охолодження, що підвищує якість слябів для листового прокату.

Фірма KME Germany GmbH & Co. KG розробила нову конструкцію гільзового кристалізатора з хвилястою внутрішньою поверхнею, яка отримала назву «WAVE». Дане інноваційне рішення спрямоване на підвищення якості поверхні безперервнолитих заготовок. Поздовжній хвилястий профіль внутрішньої поверхні кристалізатора формує відповідний рельєф на поверхні зливка та стабілізує його рух без виникнення поперечних коливань. Крім того, така геометрія сприяє більш інтенсивному та рівномірному відведенню тепла, що забезпечує рівномірне формування твердої оболонки.

Оригінальні конструктивні рішення гільзових кристалізаторів також запропоновані компанією Danieli. Технологія POWER MOLD™ забезпечує ефективне та рівномірне охолодження завдяки системі водяних каналів, виконаних у стінках кристалізатора. Особливістю конструкції є відсутність таких каналів у кутових зонах, що дозволяє вирівняти тепловідвід по всьому перерізу. У результаті продуктивність одного струмка може зрости на 35–50 % у порівнянні з традиційними рішеннями. Наприклад, для квадратної заготовки 150×150 мм продуктивність досягає 45–55 т/год на один струмок.

Новітня п’ятиструмкова комбінована МБЛЗ, розроблена компанією SMS Concast і встановлена на заводі Kardemir A.C. (Туреччина), дозволяє здійснювати розливку сортових заготовок перерізами 150×150 і 200×200 мм, блюмів 320×480 мм, а також фасонних заготовок 500×400×110 мм. Це забезпечує високу гнучкість виробництва та повне завантаження прокатних станів підприємства.

Завдяки співпраці компанії Laiwu Steel (Китай) Co і Danieli була успішно реалізована найбільша у світі п’ятиструмкова МБЛЗ для розливки круглої заготовки. Максимальний діаметр заготовки становить 800 мм, а річна продуктивність установки сягає 1,1 млн т сталі.

Нова концепція міні-заводу компанії SMS Group (Schloemann, Concast і Mannesmann Demag), що включає вертикальну МБЛЗ із вигином у твердому стані, тунельну піч і прокатний стан, дозволяє суттєво знизити інвестиційні витрати. Це досягається за рахунок зменшення товщини сляба, що відливається (завдяки використанню «воронкоподібного» кристалізатора), а також виключення обтискної кліті.

Для забезпечення високої ефективності таких систем нового покоління необхідно вирішити низку ключових завдань, зокрема:

– оптимізацію гідродинаміки потоків рідкого металу в кристалізаторі;

– стабілізацію рівня сталі в кристалізаторі;

– рівномірне формування твердої оболонки;

– запобігання витріщенню заготовки в зоні вторинного охолодження;

– контроль температурного профілю по всій траєкторії руху заготовки.

Важливим елементом таких технологій є раціональна форма воронкоподібного кристалізатора, що забезпечує контрольовану деформацію твердої кірки без утворення критичних напружень і дозволяє отримувати заготовки, максимально наближені до прямокутного перерізу.

За даними компанії RHI (Австрія), сучасні тенденції розвитку вогнетривких матеріалів для тонкослябового лиття передбачають подальше вдосконалення конструкції занурюваних стаканів, зокрема їх внутрішньої

геометрії, кількості та форми випускних отворів, а також використання матеріалів з підвищеною стійкістю до хімічної ерозії.

Сьогодні у світі експлуатується близько 40 підприємств із технологією тонкослябового лиття, що включає 62 МБЛЗ і 65 струмків. Зокрема, технології CSP, ISP, Sumitomo та FTSC охоплюють десятки установок із сумарним річним виробництвом понад 80 млн т тонкого сляба.

Технологія розливки тонкої смуги також реалізована на двовалковій МБЛЗ заводу Outokumpu Krefeld, представлена компанією Vesuvius (Франція).

Перспективним напрямом є технологія Belt Casting Technology (BCT®), розроблена компанією SMS Siemag AG, яка передбачає горизонтальне лиття металевої стрічки. Дана технологія вже впроваджена на заводі Salzgitter Flachstahl GmbH і є значним кроком до отримання заготовок, максимально наближених за формою до кінцевого прокату.

Під час розливки заготовок великого перерізу (товсті сляби, блюми) особливе значення має явище осьової сегрегації, яке найбільш виражене при товщині 350–400 мм. Ефективним методом її зниження є технологія «м’якого обтиску», що полягає у прикладенні контрольованого тиску до твердо-рідкої зони заготовки.

Практичні результати, отримані на 5-струмковій МБЛЗ заводу Voestalpine Stahl Donawitz GmbH (Австрія) для круглої заготовки діаметром 230 мм, підтверджують високу ефективність цього методу. Очікується, що сучасні спеціально адаптовані МБЛЗ здатні забезпечити ще кращі результати щодо зниження макросегрегації та вирівнювання структури металу.

Shanghai Metallurgy Equipment Group (SME Group, Китай) – один із провідних китайських постачальників комплексних металургійних рішень та обладнання для виробництва сталі, зокрема і МБЛЗ (рис. 2.7).

Окремою тенденцією є розвиток «інтелектуальних» МБЛЗ, які оснащуються системами онлайн-моніторингу температури, рівня металу, швидкості витягування заготовки та автоматичного регулювання вторинного охолодження. Це дозволяє мінімізувати дефекти лиття та забезпечувати

стабільні властивості металопродукції.

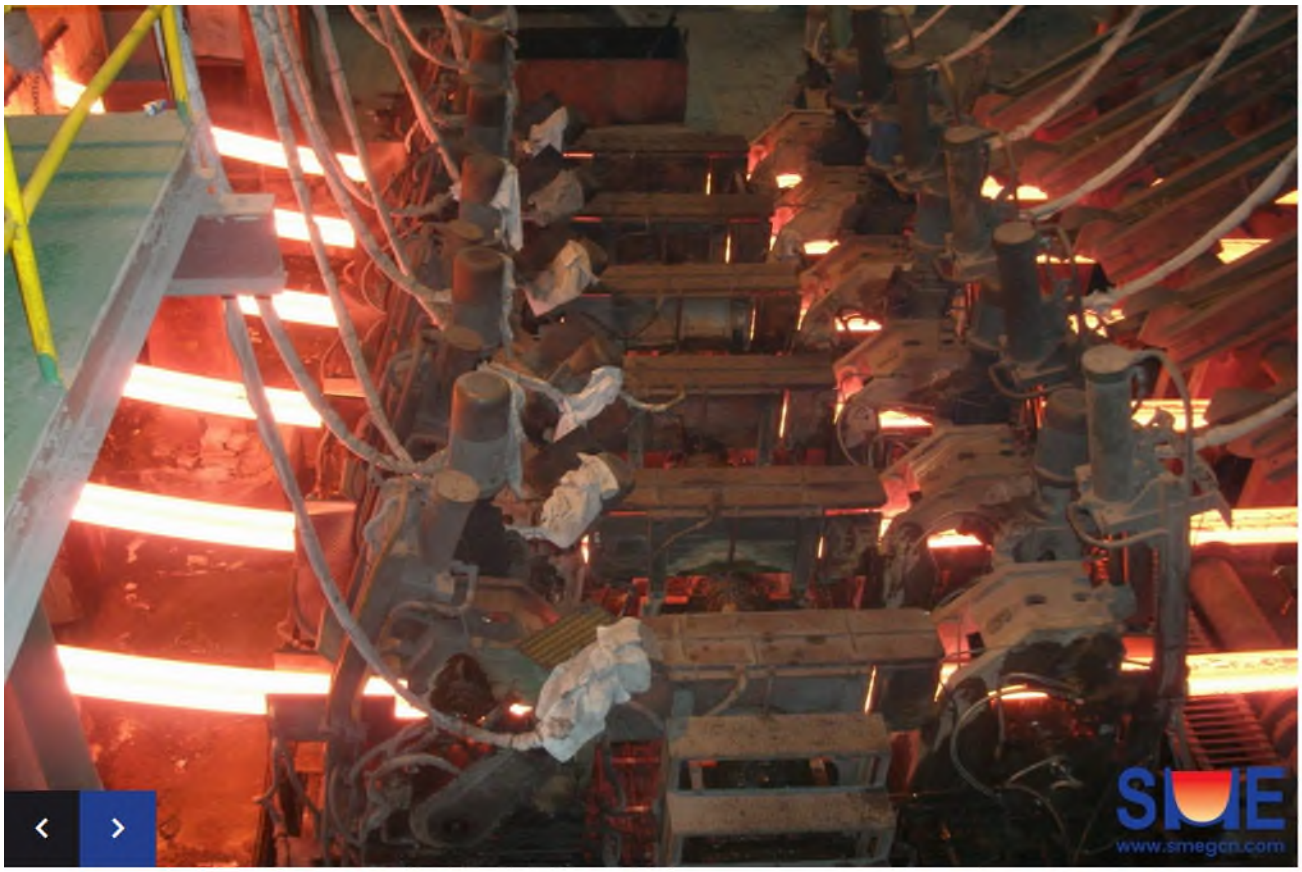


Рисунок 2.7 – МБЛЗ виробництва SME Group

Отже, сучасними лідерами у виробництві МБЛЗ є Німеччина, Австрія, Італія, Японія та Китай (табл. 2.1). Європейські та японські виробники орієнтовані на максимальну якість заготовок і автоматизацію процесів, тоді як китайські компанії забезпечують високу продуктивність за нижчої вартості обладнання. Українські МБЛЗ переважно представлені вертикально-криволінійними установками, що забезпечують виробництво широкого сортаменту сталевих заготовок для прокатного виробництва.

Найбільш поширеними у світовій практиці є дво-, чотири- та шестиручайні МБЛЗ (табл.. 2.2) , які забезпечують оптимальне поєднання продуктивності, надійності роботи та якості безперервнолитої заготовки.

Провідні виробники металургійного обладнання з Німеччини, Австрії, Італії та Японії переважно пропонують МБЛЗ із кількістю ручаїв від 2 до 6,

Таблиця 2.1 – Характеристики МБЛЗ різних країн-виробників

Країна	Провідні виробники МБЛЗ	Типи МБЛЗ	Максимальна швидкість розливки, м/хв	Типові перерізи заготовок	Особливості
Німеччина	SMS group	Криволінійні, вертикально-криволінійні, тонкосмугові	5–8	Сляби, блюми, заготовки	Високий рівень автоматизації, цифровий контроль процесу
Австрія	Primetals Technologies	Слябові, сортові, тонкосмугові	6–10	100×100 – 400×2500 мм	Технології бездефектного лиття та динамічного м'якого обтиснення
Китай	Shanghai Metallurgy Equipment Group, CISDI	Усі типи МБЛЗ	4–8	Сляби, блюми, сортові заготовки	Висока продуктивність та відносно низька вартість обладнання
Японія	Mitsubishi Heavy Industries	Вертикально-криволінійні, тонкосмугові	5–9	Тонкі та товсті сляби	Підвищена якість поверхні та внутрішньої структури металу
Італія	Danieli	Сортові, блюмові, слябові	5–10	100×100 – 600×2500 мм	Широке застосування технології «compact casting»
США	Nucor Corporation, Cleveland-Cliffs	Тонкослябові, криволінійні	6–12	Тонкі сляби 50–90 мм	Висока інтеграція з прокатними станами
Україна	Новокраматорський машинобудівний завод	Вертикально-криволінійні, радіальні	1,5–5	100×100 – 300×360 мм; сляби до 250×2000 мм	Використовуються на металургійних комбінатах України
Південна Корея	POSCO	Слябові та тонкослябові	6–10	Сляби та тонкі сляби	Високий рівень автоматизації та контролю якості

орієнтуючись на високу якість металопродукції та гнучкість виробництва. Водночас Китай та Індія активно впроваджують багаторучайні установки на 8–10 ручаїв, що дозволяє значно збільшити обсяги виробництва сталі та знизити питомі витрати на виготовлення заготовок. Для металургійних підприємств України найбільш характерними є дво- та чотириручайні МБЛЗ, які відповідають існуючим виробничим потужностям та номенклатурі продукції. Такі установки забезпечують достатню продуктивність і стабільну якість безперервнолитих заготовок при відносно помірних капітальних витратах.

Таблиця 2.2 – Типова кількість ручаїв МБЛЗ у різних країнах

Країна	Провідні виробники / металургійні компанії	Найпоширеніша кількість ручаїв	Максимальна кількість ручаїв
Китай	CISDI, SME Group, Baosteel	4–6	8–10
Німеччина	SMS Group	2–6	8
Австрія	Primetals Technologies	2–6	8
Італія	Danieli	2–6	8
Японія	Mitsubishi Heavy Industries, Nippon Steel	2–4	6
Південна Корея	POSCO	2–4	6
США	Nucor, Cleveland-Cliffs	1–4	6
Індія	SAIL, Tata Steel	2–6	8
Україна	НКМЗ, Метінвест	1–4	6
Туреччина	İçdaş, Tosyalı	2–6	8

2.3 Ливарно-прокатні агрегати як ефективний засіб інтеграції процесів лиття та прокатки

Одним із найсучасніших напрямів удосконалення процесів виробництва прокату є створення ливарно-прокатних агрегатів (ЛПА), або, як їх ще називають, ливарно-прокатних модулів (ЛПМ).

До складу такого агрегату входять: машина безперервного лиття заготовок (блюмова, слябова або сортова), пристрої для передачі безперервнолитої заготовки, піч для підігріву та безпосередньо прокатний стан відповідного типу з усім технологічним обладнанням.

Застосування такої технології дозволяє практично повністю використовувати первинну теплоту безперервнолитої заготовки для її подальшої деформації, що суттєво знижує витрати енергії на нагрівання. Також виключається проміжне складування заготовок, що значно підвищує продуктивність прокатного стану (до 25 %) та ефективність використання обладнання.

Ще однією перевагою ливарно-прокатних агрегатів є компактне компонування обладнання, що зменшує виробничі площі та капітальні витрати на будівництво (до 1,5 раза).

Слід також зазначити, що деформація литого металу в умовах суміщеного процесу сприяє покращенню якості поверхні та структури заготовок. Завдяки поєднанню процесів розливки і прокатки знижується собівартість прокату за рахунок підвищення виходу придатного металу (на 2 %) та скорочення витрат на переділи.

На ливарно-прокатних агрегатах можна отримувати заготовки різних профілів, у тому числі малих перерізів, без зниження продуктивності заводу, оскільки сталь розливається у кристалізатор одного оптимального розміру, під який розробляються всі калібрування прокатного стану.

Водночас у процесі суміщення МБЛЗ і прокатного стану існує низка проблем, зокрема узгодження швидкості безперервної розливки та швидкості

входу металу в першу кліть прокатного стану, які можуть відрізнятися у кілька разів. Також складним є забезпечення стабільно високої якості заготовки через обмежені можливості коригування процесу на стику двох агрегатів.

Вирішення проблеми узгодження швидкостей розливки та прокатки зумовило появу кількох основних схем компонування цих агрегатів:

– пряма стиковка з різанням зливка перед подачею в прохідну піч (або без різання);

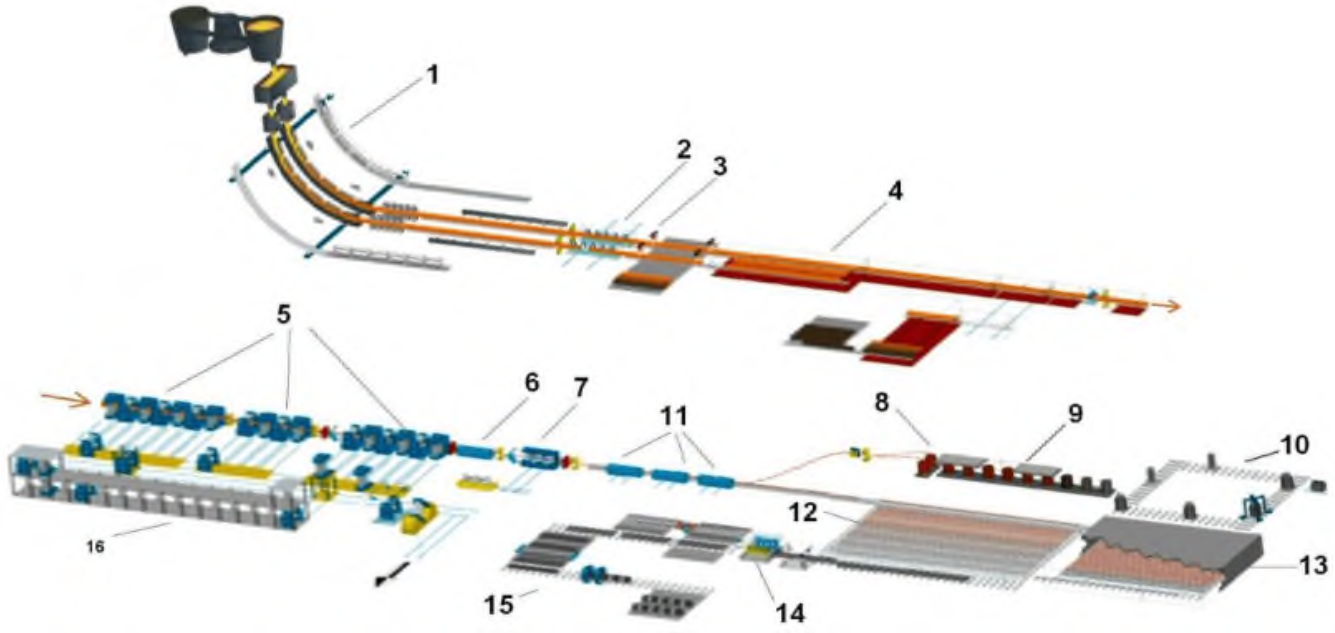
– стиковка з використанням пристроїв інтенсивної пластичної деформації (планетарні кліті, кліті гвинтової прокатки, ковальські машини тощо) у першому проході;

– стиковка з використанням високошвидкісних МБЛЗ: валкових, стрічкових, роторних тощо;

– стиковка сортового стану зі слябовою МБЛЗ з поперечним різанням сляба на заготовки або прокаткою сляба «на ребро».

Схему розташування обладнання ливарно-прокатного модуля (наведено на рис. 2.8. В основу комплексу покладено двострумкову машину безперервного лиття заготовок із відстанню між струмками 2 м та базовим радіусом вигину 9 м. Залежно від виробничих потреб установка може працювати як на двох, так і на одному струмку. Розливання здійснюється у заготовки перерізом 200×160 мм. Конструкцією МБЛЗ передбачено механізм швидкої заміни підтримувальних роликів, що дозволяє виконувати цю операцію менш ніж за 10 хвилин. Швидкість розливки залежить від марки сталі і становить: для вуглецевих сталей – до 6 м/хв, для цементованих – 5,5 м/хв, для пружинних – 5 м/хв, для мікролегованих сталей – 4,5 м/хв, для підшипникових – 4 м/хв, а для корозійностійких – близько 3,5 м/хв.

Ливарно-прокатні модулі забезпечують безперервний технологічний цикл від розливки сталі до отримання готового прокату, що дозволяє максимально використовувати тепло заготовки, скорочувати енергетичні витрати та підвищувати продуктивність виробництва.



1 – МБЛЗ; *2* – гартівні камери; *3* – ножиці; *4* – тунельна піч; *5* – чорнова, проміжна та чистова групи клітей прокатного стану; *6* – лінія охолодження; *7* – редукційно-калібрувальний блок; *8* – моталки; *9* – піч відпалу бунтів; *10* – ділянка обробки бунтів; *11* – ділянка остаточного охолодження; *12* – холодильник; *13* – піч відпалу; *14* – установка механічного видалення окалини; *15* – ділянка обробки прутків, *16* – ділянка зміни та обслуговування клітей

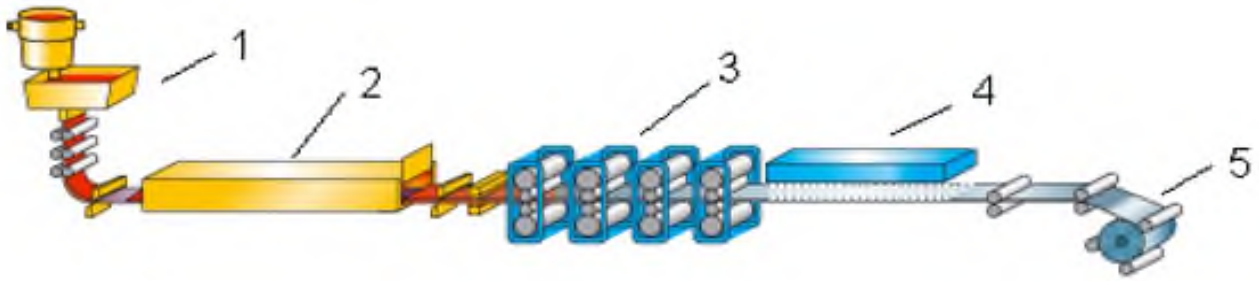
Рисунок 2.8 – Схема розташування обладнання ЛПМ фірми «ABS» в Удіне

Найбільшого поширення у світовій практиці набули листові ливарно-прокатні модулі. Їх конструкції відрізняються складом обладнання та товщиною слябів, що відливаються. Залежно від цього розрізняють тонкослябові ЛПМ з товщиною сляба 50–80 мм, середньослябові – 100–150 мм та товстослябові – 180–250 мм. Найбільш інтенсивний розвиток останніми десятиліттями отримали саме тонкослябові технології, які забезпечують значне скорочення виробничих витрат та підвищення ефективності металургійного виробництва.

Однією з найвідоміших технологій тонкослябового виробництва є CSP (Compact Strip Production – компактне виробництво смуги), розроблена фірмою

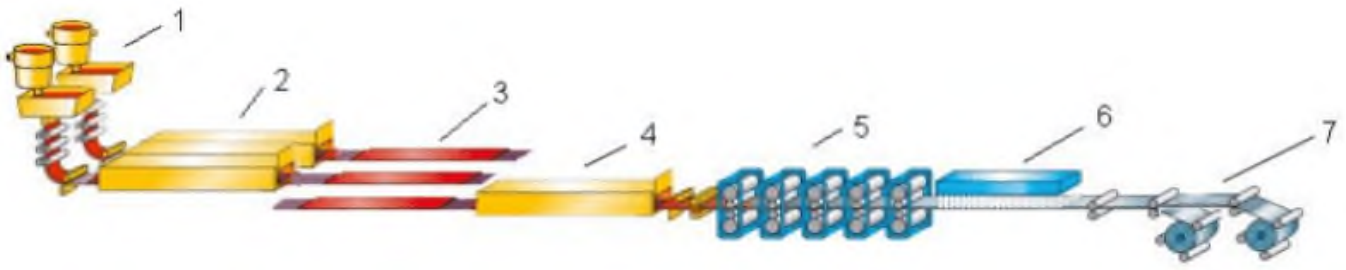
Schloemann Siemag. На сьогодні ця технологія успішно впроваджена на десятках ливарно-прокатних комплексів у різних країнах світу. До складу агрегатів CSP входять МБЛЗ, прохідна піч, прокатний стан, система охолодження та моталки для змотування готової смуги. Залежно від виробничої схеми можуть використовуватись одно- або двострумкові варіанти виконання.

Одно-та двоструменевий агрегати CSP приведені на рис. 2.9 та 2.10.



1 – машина безперервного лиття заготовок; *2* – прохідна піч; *3* – прокатний стан; *4* – ділянка охолодження; *5* – моталка

Рисунок 2.9 – Схема одноструменевого агрегату CSP прямої прокатки смуги



1 – двоструменева МБЛЗ; *2* – прохідна піч; *3* – пристрій поперечного транспортування; *4* – піч витримки; *5* – прокатний стан; *6* – ділянка охолодження; *7* – моталки

Рисунок 2.10 – Схема двоструменевого агрегату CSP з пристроєм поперечного транспортування

Ще одним перспективним різновидом ливарно-прокатних модулів є технологія ISP (In-line Strip Production). За загальною компоновкою вона подібна до CSP, проте має ряд конструктивних особливостей, які дозволяють

отримувати більш тонку листову продукцію. У процесі ISP тонкі сляби після виходу з кристалізатора додатково обтискаються до товщини близько 50 мм, а потім прокочуються в тривалковому редукційному стані HRM (High Reduction Mill) до товщини 13–17 мм.

Важливою особливістю технології є збереження високої температури серцевини заготовки, яка під час прокатування становить близько 1400–1500 °С, тоді як температура поверхневих шарів знаходиться в межах 1150–1200 °С. Такий температурний розподіл забезпечує зменшення опору деформації в центральній частині металу, більш рівномірне обтиснення по товщині та покращення якості готового прокату.

Для виробництва тонколистової сталі підкат після чорнової прокатки подається в індукційний нагрівач, а потім у пічну моталку, яка виконує функцію проміжного накопичувача між чорновою та чистовою групами клітей. Після цього метал надходить у безперервну чистову групу клітей кварто, де формується кінцева товщина та необхідні властивості готової смуги.

На одному з ЛПМ компанії Danieli для POSCO (Південна Корея) досягнуто продуктивності близько 2 млн т рулонного листа на рік на один струмок. При цьому середня швидкість розливки становить 7,0 м/хв, а максимальне значення сягає 8 м/хв.

2.4 Порівняльний аналіз технологічних, якісних та економічних показників способів розливки металу

Порівняння традиційної розливки у виливниці та безперервного лиття сталі дозволяє оцінити їх ефективність за технологічними, якісними та економічними критеріями. У сучасній металургії ці два способи суттєво відрізняються за рівнем продуктивності, стабільністю процесу та кінцевими характеристиками заготовок.

З технологічної точки зору безперервне лиття є значно більш прогресивним процесом. Воно забезпечує безперервність виробництва, високу

автоматизацію та стабільні умови кристалізації металу. Тривалість безперервної розливки однієї серії на МБЛЗ може становити від 4 до 12 плавок, а тривалість безперервного циклу – від 6 до 18 годин залежно від сортаменту. Швидкість розливки в середньому становить 0,5–3,5 м/хв. На відміну від цього, розливка у виливниці характеризується циклічністю процесу: тривалість одного циклу (заливка, кристалізація, витримка та розбирання) становить у середньому 4–8 годин на одну плавку, а повний технологічний цикл із підготовкою виливниць може досягати 10–12 годин. Крім того, МБЛЗ дозволяє більш точно регулювати швидкість розливки, теплові режими та процес формування кірки, що знижує ризик технологічних відхилень.

З погляду якості продукції, безперервне лиття забезпечує більш однорідну структуру металу та вихід придатного металу на рівні 92–97 %, тоді як при розливці у виливниці цей показник становить приблизно 80–88 %. Це пояснюється значними обрізями головної та донної частини зливка, а також підвищеною кількістю внутрішніх дефектів. У безперервнолитих заготовках зменшується кількість усадкових раковин, тріщин, шлакових включень і газових пор. У випадку розливки у виливниці характерними є виражені ліквацийні зони, підвищена пористість та нерівномірність структури, що часто потребує додаткової обробки або обрізки до 10–20 % маси зливка.

Економічні показники також суттєво відрізняються. Безперервне лиття характеризується нижчими питомими витратами металу та енергії: витрати умовного палива зменшуються приблизно на 20–30 % у порівнянні з виливничим способом. Собівартість 1 тонни заготовки при МБЛЗ у середньому на 10–25 % нижча за рахунок високої продуктивності та мінімізації втрат. Хоча впровадження МБЛЗ потребує значних капітальних інвестицій, окупність таких систем зазвичай становить 3–7 років. Розливка у виливниці, навпаки, має нижчі початкові витрати, але супроводжується більшими втратами металу (до 12–20 %), вищими витратами на енергію, підготовку форм та подальшу механічну обробку зливків.

2.5 Перспективи розвитку сучасних технологій розливки сталей та сплавів

Сучасні технології розливки сталей і сплавів розвиваються у напрямку підвищення якості металопродукції, зростання продуктивності та зниження енергетичних і матеріальних витрат. Основним трендом у світовій металургії є подальше вдосконалення процесів безперервного лиття, яке поступово повністю витісняє традиційну розливку у виливниці. Це пов’язано з можливістю отримання більш однорідної структури металу, зменшенням дефектів та високим рівнем автоматизації процесу.

Одним із ключових напрямів розвитку є впровадження інтелектуальних систем керування МБЛЗ, які базуються на використанні датчиків, моделей прогнозування та елементів штучного інтелекту. Такі системи дозволяють у режимі реального часу контролювати рівень металу в кристалізаторі, швидкість розливки, теплові режими та стан кірки, що значно знижує ризик утворення дефектів поверхні та внутрішньої структури заготовок.

Важливим напрямом також є вдосконалення конструкції кристалізаторів і систем вторинного охолодження. Використання нових матеріалів із підвищеною теплопровідністю та зносостійкістю, а також оптимізація геометрії кристалізатора сприяють рівномірному формуванню твердої кірки та зменшенню термічних напружень. Крім того, активно розвиваються технології м’якого охолодження (soft cooling), які дозволяють знизити ймовірність утворення тріщин.

Перспективним є також удосконалення технологій позапічної обробки сталі, зокрема установок «ківш-піч», вакуумування та продувки інертними газами. Це забезпечує зниження вмісту шкідливих домішок, газів та неметалевих включень, що безпосередньо підвищує якість безперервнолитої заготовки.

Окремий напрям розвитку пов’язаний із підвищенням гнучкості МБЛЗ, зокрема можливістю швидкої зміни сортаменту, розливки малими серіями та

наближення геометрії заготовки до кінцевого прокату (near-net-shape casting). Це дозволяє суттєво зменшити обсяги подальшої механічної обробки та втрати металу.

Також перспективним є розвиток екологічно орієнтованих технологій, спрямованих на зниження енергоспоживання, зменшення викидів CO_2 та повторне використання тепла й відходів виробництва. У поєднанні з цифровізацією та автоматизацією це формує основу «зеленої металургії» майбутнього.

Таким чином, подальший розвиток розливки сталі та сплавів базуватиметься на інтеграції високотехнологічного обладнання, цифрових систем керування та ресурсоефективних рішень, що забезпечить підвищення якості продукції та конкурентоспроможності металургійних підприємств.

3 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ РОЗЛИВКИ СТАЛІ

3.1 Розрахунок схеми літникової системи для розливки сталі у виливниці сифоном

Розливка сталі сифоном ґрунтується на принципі сполучених посудин. За такою схемою можна одночасно заповнювати від двох до шістдесяти виливниць. Розміри піддону при цьому визначаються кількістю виливниць, які встановлюються на ньому одночасно.

Відомо, що під час руху рідини по каналах вона зустрічає гідравлічні опори, на подолання яких необхідний певний запас напору. Такий напір створюється за рахунок перевищення рівня літника над заданою висотою заповнення виливниць металом.

Для визначення висоти літника виконується гідравлічний розрахунок усієї системи. На рис. 3.1 наведено схему системи літника для сифонової розливки сталі у виливницю.

Гідравлічний розрахунок системи зводиться до визначення сумарних втрат напору на всьому шляху руху рідкого металу через елементи літникової системи до виливниці. При цьому конструкцію необхідно спроєктувати таким чином, щоб забезпечити подолання всіх основних опорів.

До них відносять:

а) втрати на тертя металу об стінки каналів;

б) місцеві опори, що виникають у місцях поворотів і розгалужень потоку;

в) гідростатичні втрати, пов’язані з перепадами рівнів (у багатьох випадках вони частково компенсуються, оскільки метал у підвідних каналах рухається вниз, а у виливниці – вгору).

Додатково слід враховувати, що ефективність сифонової розливки значною мірою залежить від герметичності системи, якості футерування каналів та стабільності витрати металу. Оптимально підібрана конструкція

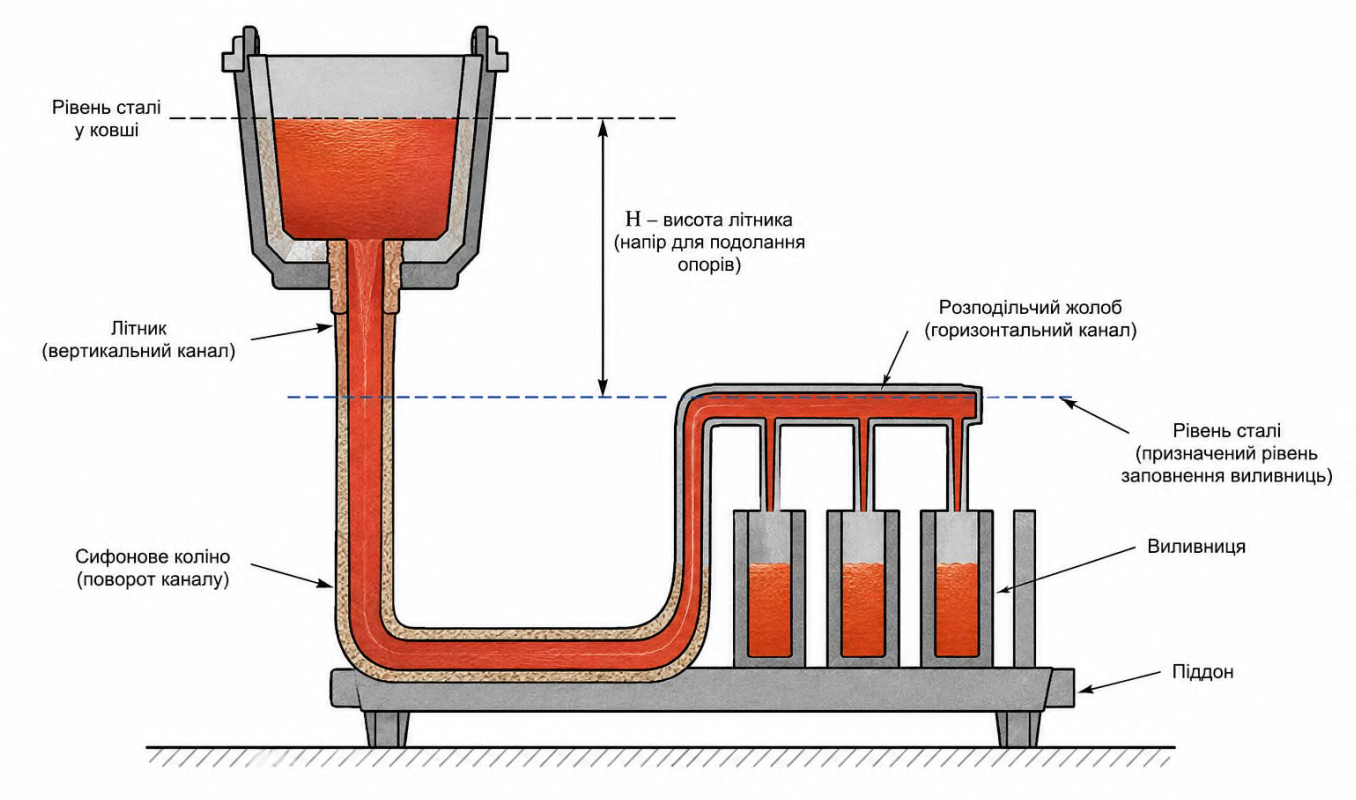


Рисунок 3.1 – Схема системи літника для розливки сталі сифоном

літникової системи дозволяє забезпечити рівномірне заповнення всіх виливниць, зменшити турбулентність потоку та мінімізувати вторинне окиснення сталі, що позитивно впливає на якість зливків.

Втрати натиску на подолання сил тертя визначаються за наступною формулою:

$$h_{\text{тр}} = f\frac{l}{d}\times\frac{w_0^2}{2g}g_p\text{, мм.вод.ст.,} \qquad (3.1)$$

де w_0 – швидкість руху сталі в проводках, м/сек;

f – коефіцієнт тертя;

l – довжина ділянки, м;

d – гідравлічний або приведений діаметр каналу, м;

g – прискорення сили тяжіння, рівне 9,81 м/сек^2;

g_p – щільність рідкої сталі, рівне 7 т/м^3.

Швидкість руху сталі може бути визначена таким чином. Під час відливання зливків, наприклад масою 6,5 т, об’єм рідкого металу становить:

$$6{,}5 : 7 = 0{,}93 \text{ м}^3,$$

де 7 – щільність рідкої сталі, т/м^3.

При тривалості розливання куща 6 хв. секундний об'єм металу дорівнює:

$$\frac{0{,}93}{6\times 60} = 0{,}00257 \text{ м}^3.$$

При діаметрі сифонових проводок 50 мм площа поперечного перетину дорівнює:

$$F = \frac{pd^2}{4} \qquad (3.2)$$

$$F = \frac{3{,}14 \times 0{,}05^2}{4} = 0{,}002 м^2 .$$

Швидкість руху сталі в проводках рівна 0,00257/ 0,002= 1,29 м/сек.

Коефіцієнт тертя для рідини при турбулентному русі визначається за формулою:

$$f = \frac{0{,}3164}{Re^{0{,}25}}, \tag{3.3}$$

де *Re* – число Рейнольдса, визначуване за формулою:

$$\mathrm{Re} = \frac{w_0 d}{n}. \tag{3.4}$$

n – кінематична в'язкість, яка для сталі приймається рівною 0,004см^2/сек.

$$\mathrm{Re} = \frac{1{,}29 \times 0{,}05 \times 10^4}{0{,}004} = 160000$$

$$f = \frac{0{,}3164}{Re^{0{,}25}} = \frac{0{,}3164}{20} = 0{,}0158 .$$

При довжині горизонтальної проводки 1м втрата натиску на подолання тертя складе:

$$h_{\text{тр}} = f \frac{l}{d} \times \frac{w_0^2}{2g} g_p \tag{3.5}$$

$$h_{\text{тр}} = 0{,}0158 \frac{1}{0{,}05} \times \frac{1{,}29^2}{2 \times 9{,}81} \times 7000 = 186 \text{ мм вод.ст.}$$

Для підрахунку місцевих опорів необхідно визначити швидкісний натиск сталі:

$$h_{\text{ст}} = \frac{w_0^2}{2g} g_p \qquad (3.6)$$

$$h_{\text{ст}} = \frac{1{,}29^2}{2 \times 9{,}81} \times 7000 = 585 мм.вод.ст.$$

Під час руху металу в сифонній системі розливки потік сталі змінює напрямок двічі на кут 90°. Перший поворот відбувається при переході металу з літника в сифонову проводку, а другий – під час надходження сталі із сифонової проводки у виливницю. Для кожного такого повороту коефіцієнт місцевого гідравлічного опору приймається рівним 1. Оскільки в системі наявні два повороти на 90°, сумарний коефіцієнт опору становить: k=1+1=2.

Урахування цих місцевих опорів є необхідним під час розрахунку швидкості руху металу та визначення параметрів сифонної системи, оскільки вони спричиняють додаткові втрати напору і впливають на умови заповнення виливниць рідкою сталлю.

Втрати натиску на подолання місцевих опорів:

$$h_м = k \cdot h_{ст} \qquad (3.7)$$

$$h_м = 2 \cdot 585 = 1170 \text{ мм вод. ст.}$$

Втрати натиску при вході струменя у виливницю (к= 1):

$$h_м = 1 \cdot 585 = 585 \text{мм вод. ст.}$$

Сумарні втрати натиску дорівнює:

$$\sum h = h_{тр} + h_{ст} + h_м \qquad (3.8)$$

$$\sum h = 186 + 1170 + 585 = 1941 \text{мм вод. ст.}$$

Необхідна висота літникового каналу над рівнем дзеркала сталі у виливниці в кінці процесу розливки становить певну величину. Цей параметр потрібен для забезпечення стабільного надходження металу у виливницю без підсмоктування повітря та утворення турбулентних потоків. Завдяки цьому запобігають окисненню сталі, зменшують утворення шлакових включень і забезпечують більш якісне формування зливка. Необхідне перевищення літника над рівнем дзеркала сталі у виливниці дорівнює:

$$DH = \frac{å\ h}{g_p} \tag{3.9}$$

$$DH = \frac{1941}{7000} = 0{,}278м\ .$$

Рекомендовані значення цього параметра становлять 200–300 мм. У випадку використання розгалужених підвідних каналів на піддоні висота перевищення літника над рівнем металу у виливниці може збільшуватися до 400–500 мм.

Визначення діаметру центрової проводиться за формулою:

$$d = 2\sqrt{\frac{mQ}{pдk}}\ , \tag{3.10}$$

де d – діаметр центрової, см;

m – кількість виливниць у кущі (визначається масою зливків, продуктивністю плавки, місткістю сталерозливного ковша та особливостями організації процесу розливки), шт.;

Q – маса зливка, кг;

p – постійна, яка дорівнює 3,14;

¶ – тривалість заповнення однієї виливниць, сек.;

k – коефіцієнт, що враховує пропускну спроможність центрової, коливається в межах 0,5–1,3 кг/с^2 сек.

Для даного розрахунку приймаємо к=0,9, тоді:

$$d = 2\sqrt{\frac{4 \times 6500}{3{,}14 \times 360 \times 0{,}9}} = 9{,}9 см .$$

Приймаємо діаметр рівним 100 мм (приймаємо граничні області 120, 140 мм і т.д., крок становить 20мм).

Отже, у виливні сифонним способом доцільно розливати сталі, для яких важливо забезпечити спокійне заповнення форми та отримання якісної поверхні зливка: вуглецеві конструкційні сталі; низьколеговані сталі; леговані сталі; підшипникові сталі; інструментальні сталі; деякі марки неіржавіючих сталей. Перевагою сифонної розливки є те, що метал надходить у виливницю знизу через систему сифонних каналів, завдяки чому зменшується турбулентність потоку, окиснення металу та захоплення неметалевих включень. Це сприяє підвищенню якості поверхні зливків і зменшенню кількості дефектів. Тому сифонну розливку найчастіше застосовують для якісних і високоякісних сталей, коли до чистоти металу та якості поверхні висуваються підвищені вимоги.

3.2 Вибір типу машин безперервного лиття заготовок і розрахунок їх необхідної кількості для сталеплавильного цеху заданої продуктивності

На вибір типу машин безперервного лиття заготовок впливає комплекс технологічних, організаційних та конструктивних факторів. До основних із них належать заданий рівень річної продуктивності цеху, сортамент виплавлюваних сталей, схема планування сталеплавильного та розливного відділень, а також конструктивні особливості й технічні параметри самих машин. Важливе значення має також номенклатура литих заготовок, зокрема їх перерізи та геометричні характеристики.

Продуктивність МБЛЗ визначається сукупністю технологічних параметрів процесу безперервного лиття. Серед них ключову роль відіграють марка сталі та її ливарні властивості, форма і розміри поперечного перерізу

заготовки, швидкість розливання, кількість струмків (руч'їв) машини, а також рівень автоматизації та стабільність технологічного процесу. Крім того, на фактичну продуктивність суттєво впливають умови охолодження, режим роботи обладнання та організація безперервності розливання.

Вихідні дані для розрахунку:

1. Задане виробництво цеху (В), млн.т/р ……..1,2

2. Сортамент сталей, що розливаються ….....підшипникові

3. Місткість сталерозливного ковша, т……130

4. Місткість проміжного ковша від місткості сталерозливного ковша, %.....10

5. Кількість плавок, розлитих методом «плавка на плавку», %.....80

Підшипникові сталі (наприклад, марок ШХ15, ШХ15СГ, ШХ4, ШХ9, ШХ12, ШХ15Г) доцільно розливати на МБЛЗ у безперервному режимі із застосуванням захищеного струменя металу (занурювальні стакани, шлаковий покрив), що забезпечує високу чистоту сталі. Краще використовувати МБЛЗ радіального або криволінійного типу, бо вони забезпечують більш м'які умови формування та випрямлення заготовки, зменшують рівень внутрішніх напружень і ризик утворення тріщин, а також сприяють стабільнішому процесу кристалізації.

3.2.1 Вибір швидкості розливки та обчислення протяжності зони вторинного охолодження

Швидкість безперервної розливки металу визначається сукупністю технологічних параметрів процесу, умовами кристалізації та охолодження заготовки, а також вимогами до її якості, серед яких основним є товщина поперечного перерізу заготовки.

Для подальших розрахунків приймаємо переріз заготовки підшипникової сталі розміром 265×340 мм.

Для заготовок товщиною 265 мм приймаємо середню швидкість

витягання: $V_{ср} = 0{,}5 м/хв.$

При проєктуванні МБЛЗ передбачається можливість підвищення швидкості витягування заготовки для забезпечення необхідної продуктивності установки, розширення сортаменту виробів та оптимізації технологічного режиму розливання залежно від марки сталі і перерізу заготовки.

В розрахунку резерв швидкості прийнято 50%.

$$V_{рез} = V_{ср} + 0{,}5V_{ср} \qquad (3.11)$$

$$V_{рез} = 0{,}5 + 0{,}5 \times 0{,}5 = 0{,}75 м/хв.$$

Час повного затвердження заготовки розраховуємо за формулою:

$$t_{кр} = \frac{в^2}{4к^2}, \qquad (3.12)$$

де в – товщина заготівки, мм;

к – коефіцієнт твердіння, мм/хв$^{1/2}$.

Прийнявши к=28 мм/хв$^{1/2}$, отримуємо:

$$t_{кр} = \frac{265^2}{4 \cdot 28^2} \approx 22 хв.$$

Протяжність зони вторинного охолодження:

$$Z_{вт.охол.} = V_{рез.} \times t_{кр.} \qquad (3.13)$$

$$Z_{вт.охол.} = 0{,}75 \cdot 22 = 16{,}5 м.$$

Протяжність тягнучої кліті приймаємо: $Z_{т.к.} = 3 м.$

3.2.2 Розрахунок тривалості циклу роботи МБЛЗ

1. Підготовка машини до розливки сталі

Приймаємо максимальну швидкість витягання:

$$V_{\max} = 1{,}5 м/хв.$$

Час вводу затравки – t_1:

$$t_1 = \frac{Z_{вт.охол.} + Z_{т.к.}}{V_{\max}} \qquad (3.14)$$

$$t_1 = \frac{16{,}5 + 3}{1{,}5} = 13 хв.$$

Приймаємо час підготовки кристалізатора $t_2 = 10 хв.$ і подачі сталерозливного ковша на стенд $t_3 = 3 хв.$

Загальний час підготовки машини до розливки сталі:

$$t_{\substack{загал. \\ підгот.}} = t_1 + t_2 + t_3 \qquad (3.15)$$

$$t_{\substack{загал. \\ підгот.}} = 13 + 10 + 3 = 26 хв.$$

2. Розливка металу на МБЛЗ

Масова швидкість розливки на один рівчак:

$$q_p = a \times б \times V_{ср} \times g_p, \qquad (3.16)$$

де а, б – розміри сторін прямокутного перерізу заготовки, м;

g_p – щільність рідкої сталі (7,0 т/м ^{3}).

Для заготовки перерізу 265х340мм:

$$q_p = 0{,}265 \times 0{,}340 \times 0{,}5 \times 7 = 0{,}32 m / хв.$$

Місткість проміжного ковша ($m_{проміж.ковша}$) – 10÷25% маси рідкого металу в сталерозливному ковші.

Приймаємо місткість проміжного ковша 10%: $m_{проміжковша} = 0{,}1 \times 130 = 13 m$.

Час наповнення проміжного ковша при розливці заготовок перерізу 265х340 мм:

$$t_{н.п.к.} = \frac{m_{проміж.ковша}}{n_{кр.} \times q_p} \qquad (3.17)$$

$$t_{н.п.к.} = \frac{13}{4 \times 0{,}32} \approx 10 хв.,$$

де $n_{кр}$ – кількість кристалізаторів.

Час розливки плавки:

$$t_{\substack{розлив. \\ плавки}} = \frac{m_{сталерозлив.ковша}}{n_{кр.} \times q_p} \qquad (3.18)$$

$$t_{\substack{розлив. \\ плавки}} = \frac{130}{4 \times 0{,}32} \approx 102 хв.$$

3. Видача заготовки в МБЛЗ

Час закінчення видачі заготовки з МБЛЗ:

$$t_{з.в.з.} = \frac{Z_{вт.охол.} + Z_{т.к.}}{V_{ср}} \qquad (3.19)$$

$$t_{з.в.з.} = \frac{16,5+3}{0,5} = 39хв.$$

4. Визначення ритму роботи машини

У цеху передбачається, що близько 80% металу буде розливатися за схемою «плавка на плавку», тоді як решта 20% – окремими, одиничними плавками.

Метод «плавка на плавку» полягає в безперервній послідовній розливці сталі з кількох плавок без зупинки МБЛЗ. Після завершення однієї плавки розлив продовжується наступною плавкою з мінімальними технологічними перервами або без них. Такий підхід дозволяє підвищити продуктивність обладнання, зменшити втрати часу на підготовчо-завершальні операції та забезпечити більш стабільний тепловий і технологічний режим кристалізації. Крім того, він сприяє покращенню якості заготовок завдяки більш рівномірним умовам розливки. Одиничні плавки застосовуються у випадках зміни марки сталі, режимів роботи або при технологічних обмеженнях.

Тоді тривалість циклу розливання серії з n=4 плавок:

$$t_{цикла} = t_{\substack{загал.\\підгот.}} + t_{н.п.к.} + t_{\substack{розлив.\\плавки}} \times 4 + t_{з.в.з.} \qquad (3.20)$$

$$t_{цикла} = 26+10+102\times4+39 = 483хв.$$

Середня тривалість однієї плавки в серії:

$$t_{\substack{однієї\\плавки\\серії}} = \frac{t_{ц}}{n} \qquad (3.21)$$

$$t_{\substack{однієї\\плавки\\серії}} = \frac{483}{4} » 121хв.$$

Тривалість розливки одиничної плавки:

$$t_{\substack{одинична \\ плавка}} = t_{\substack{зазал. \\ підгот.}} + t_{н.п.к.} + t_{\substack{розлив. \\ плавки}} + t_{з.в.з.} \quad (3.22)$$

$$t_{\substack{одинична \\ плавка}} = 26 + 10 + 102 + 39 = 177 хв.$$

Час середньої тривалості розливки однієї плавки по цеху:

$$t_{\substack{ср.розлив. \\ плавки}} = t_{\substack{однієї \\ плавки \\ серії}} \times 0{,}8 + t_{\substack{одинична \\ плавка}} \times 0{,}2 \quad (3.23)$$

$$t_{\substack{ср.розлив. \\ плавки}} = 121 \times 0{,}8 + 177 \times 0{,}2 \approx 132 хв.$$

5. Розрахунок продуктивності МБЛЗ

Кількість робочих днів на рік:

$$A = 365 - 30 = 335 дн.,$$

де 30 днів – тривалість ремонтів (24 дні – профілактичний, 6 днів – капітальний).

Річна продуктивність одної МБЛЗ:

$$E = \frac{335 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 130 \cdot 0{,}98}{134} = 458640 m, \quad (3.24)$$

де 24 – кількість годин за добу;

60 – кількість хвилин у годині;

130 – маса рідкого металу у ковші, т;

0,98 – вихід заготівок з рідкого металу;

121 – середня тривалість однієї плавки, хв.

Для забезпечення річного обсягу розливки 1,2 млн т заготовок необхідна відповідна кількість МБЛЗ становить:

$$H = \frac{B}{E} \tag{3.25}$$

$$H = \frac{1200000}{458640} = 2{,}616 \approx 3.$$

Приймаємо три МБЛЗ криволінійного типу (рис. 3.2).

Річна продуктивність трьох МБЛЗ становить:

$$458640 \cdot 3 = 1375920.$$

Коефіцієнт використання потужності МБЛЗ:

$$k = \frac{B}{E \cdot 3} \tag{3.26}$$

$$k = \frac{1200000}{1375920} \cdot 100\% = 87{,}214\%.$$

МБЛЗ криволінійного типу має низку важливих переваг. Завдяки вигнутій траєкторії кристалізації значно зменшується загальна висота установки, що дозволяє спростити будівництво цеху та знизити капітальні витрати. Такі машини є більш компактними, тому потребують менше виробничого простору та легше вписуються в існуючі металургійні підприємства. Крім того, зменшена висота конструкції підвищує безпеку обслуговування та ремонту обладнання. Криволінійні МБЛЗ також забезпечують високу продуктивність і стабільну якість литих заготовок, що робить їх найбільш поширеними в сучасній металургійній практиці.

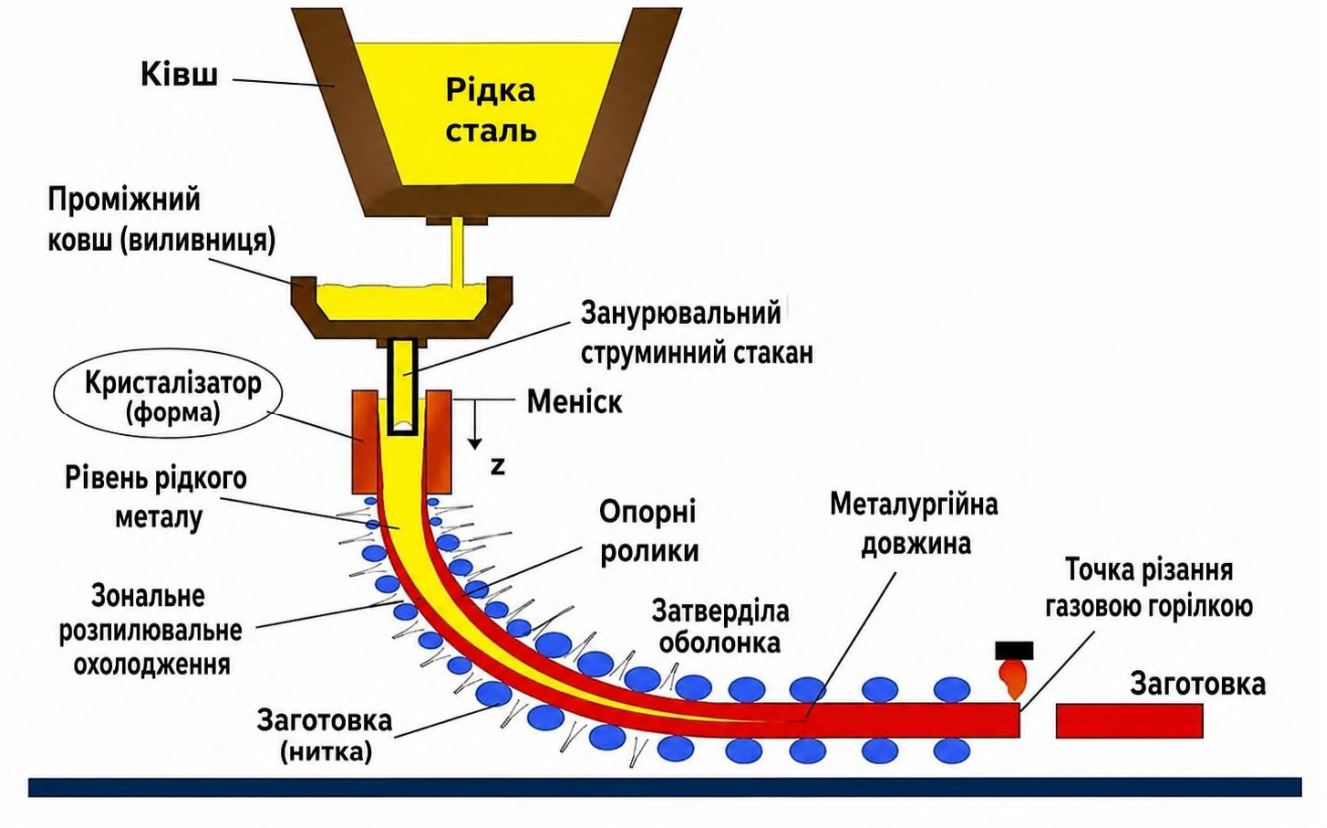


Рисунок 3.2 – Машина безперервного лиття заготовок криволінійного типу

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів у розливному відділенні

4.1.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час розливки сталі у виливниці

Процес розливки сталі у виливниці характеризується наявністю значної кількості небезпечних і шкідливих виробничих факторів, зумовлених високими температурами рідкого металу, значними тепловими потоками та використанням великогабаритного обладнання. Температура сталі під час розливки залежно від марки та способу виплавки зазвичай становить 1500–1650 °С, а температура поверхні свіжовідлитого зливка в перші хвилини після заливання може перевищувати 1000–1200 °С. За таких умов працівники піддаються інтенсивному тепловому впливу, який може спричинити перегрів організму, теплові удари та опіки відкритих ділянок тіла.

Одним із найнебезпечніших факторів є теплове випромінювання від відкритої поверхні рідкого металу, наповнених виливниць та нагрітих елементів обладнання. Інтенсивність теплового опромінення поблизу місць розливки може досягати 1000–3500 Вт/м² і більше, що значно перевищує допустимі значення для тривалого перебування працівників без спеціальних засобів захисту. Особливо несприятливі умови виникають під час заливання великих зливків, коли працівники вимушені перебувати в зоні дії потужного інфрачервоного випромінювання.

Під час наповнення виливниць можливі викиди бризок рідкого металу та шлаку, особливо за наявності вологи на поверхні виливниць, піддонів або футерівки. Потрапляння навіть незначної кількості води в контакт із рідкою сталлю може викликати миттєве випаровування з різким збільшенням об'єму пари та вибухоподібним розбризкуванням металу на значну відстань. Суттєву

небезпеку становить також прорив металу через тріщини виливниць, пошкодження піддонів, порушення герметичності з'єднань або несправність стопорного механізму сталерозливного ковша.

До шкідливих виробничих факторів належать підвищена температура повітря робочої зони, яка в окремих місцях розливного прольоту може досягати 35–45 °С і більше, значна запиленість та загазованість атмосфери. У процесі розливки утворюються аерозолі оксидів заліза, марганцю, кремнію та інших елементів, що входять до складу сталі. Крім того, при нагріванні футерівки та допоміжних матеріалів у повітря можуть виділятися оксиди вуглецю, сірки та інші газоподібні речовини, які негативно впливають на органи дихання працівників.

У процесі підготовки виливниць, транспортування та вилучення зливків працівники зазнають впливу підвищеного рівня шуму та вібрації від роботи мостових і стриперних кранів, залізничного транспорту, механізмів очищення та іншого технологічного обладнання. Рівень шуму в окремих виробничих зонах може досягати 85–100 дБ, що при тривалому впливі здатне спричиняти погіршення слуху та підвищену втому персоналу.

Додаткову небезпеку створює переміщення важких вантажів масою від кількох тонн до десятків тонн. Порушення правил експлуатації вантажопідіймальних механізмів, несправність стропувальних пристроїв або помилки персоналу можуть призвести до падіння вантажів, механічних травм, пошкодження обладнання та виникнення аварійних ситуацій. Тому робота в розливному відділенні вимагає суворого дотримання вимог охорони праці, використання засобів індивідуального захисту та постійного контролю технічного стану обладнання.

Мікрокліматичні умови розливного відділення характеризуються значними коливаннями температури та вологості повітря, що в поєднанні з високим фізичним і психоемоційним навантаженням може призводити до швидкої втомлюваності працівників, зниження концентрації уваги та підвищення ризику виникнення виробничого травматизму.

4.1.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час розливки сталі на МБЛЗ

У розливному відділенні машин безперервного лиття заготовок небезпечні та шкідливі виробничі фактори пов'язані з безперервним процесом переміщення рідкого металу через проміжний ківш, кристалізатор, зону вторинного охолодження та вузли різання заготовок. Незважаючи на високий рівень механізації та автоматизації процесу, умови праці характеризуються впливом значних теплових, механічних та фізичних навантажень на персонал.

Найбільшу небезпеку становлять аварійні прориви металу (брейкаути), які виникають унаслідок недостатньої товщини затверділої оболонки заготовки або порушення режимів лиття. Такі аварії можуть супроводжуватися викидом десятків тонн рідкої сталі температурою 1500–1600 °С, що створює безпосередню загрозу життю працівників та може спричинити значні пошкодження обладнання. Крім того, небезпеку становлять операції заміни проміжних ковшів, занурювальних стаканів і захисних труб, під час яких персонал перебуває поблизу відкритих джерел теплового випромінювання та розплавленого металу.

До небезпечних виробничих факторів належать високі температури поверхні заготовок і технологічного обладнання. Температура поверхні безперервнолитої заготовки після виходу з кристалізатора становить приблизно 1000–1200 °С, а перед газокисневим різанням може залишатися на рівні 800–1000 °С. Температура поверхонь окремих вузлів кристалізатора, проміжного ковша та захисних екранів нерідко перевищує 200–400 °С. За таких умов навіть короткочасний контакт із обладнанням може спричинити важкі термічні опіки.

Суттєвим шкідливим фактором є інтенсивне теплове випромінювання від рідкого металу, проміжного ковша та гарячих заготовок. Щільність теплового потоку в робочій зоні поблизу струмка металу може досягати 1000–3500 Вт/м², а в окремих точках поблизу відкритої поверхні металу – понад 4000 Вт/м². Постійний вплив інфрачервоного випромінювання може викликати перегрів

організму, підвищену втому, погіршення самопочуття та зниження працездатності персоналу.

Мікроклімат у розливному відділенні МБЛЗ характеризується підвищеною температурою повітря та значними перепадами вологості. У теплий період року температура повітря поблизу технологічного обладнання може становити 30–40 °С, а в окремих зонах поблизу проміжного ковша та кристалізатора перевищувати 45 °С. Водночас у зоні вторинного охолодження спостерігається підвищена відносна вологість повітря, яка може досягати 70–90 % внаслідок інтенсивного розпилення води. Поєднання високої температури, вологості та теплового випромінювання створює несприятливі умови праці та підвищує ризик теплового перевантаження організму.

До шкідливих виробничих факторів також належить підвищений рівень шуму, джерелами якого є насоси систем охолодження, вентилятори, роликові секції, механізми витягування заготовки та обладнання газокисневого різання. Рівень шуму на окремих дільницях МБЛЗ може становити 85–100 дБ, а під час роботи кисневих різаків і потужних насосних установок короткочасно перевищувати 100 дБ. Тривалий вплив шуму такого рівня може негативно впливати на органи слуху та нервову систему працівників.

У процесі вторинного охолодження та різання заготовок утворюються пил, водяний аерозоль і продукти окиснення металу. Під час газокисневого різання в атмосферу робочої зони виділяються оксиди заліза, марганцю, вуглецю та інші шкідливі речовини, що можуть погіршувати стан органів дихання. Тому в сучасних розливних відділеннях передбачаються системи аспірації, вентиляції та очищення повітря.

Додаткову небезпеку створюють рухомі частини обладнання МБЛЗ – ролики, правильно-тягові механізми, ножиці та транспортні пристрої. Потрапляння працівника до небезпечної зони під час роботи обладнання може призвести до тяжких механічних травм. Саме тому забезпечення безпеки праці на МБЛЗ базується на комплексному використанні засобів колективного та індивідуального захисту, автоматизації виробничих операцій, ефективної

вентиляції та суворому дотриманні вимог охорони праці.

4.2 Заходи щодо забезпечення безпеки праці під час розливки сталей і сплавів

4.2.1 Заходи щодо забезпечення безпеки праці під час розливки сталей у виливниці

Під час розливки сталі у виливниці основними напрямами забезпечення безпеки праці є захист персоналу від впливу високих температур, теплового випромінювання, бризок рідкого металу та механічних небезпек. Для запобігання аваріям усі виливниці, піддони та елементи розливного обладнання повинні проходити регулярний огляд на наявність тріщин, деформацій та інших дефектів. Перед початком розливки необхідно забезпечити повне видалення вологи з поверхні виливниць і піддонів шляхом їх сушіння та підігріву, оскільки контакт води з рідким металом може спричинити вибухоподібне розбризкування сталі.

Для захисту працівників від теплового випромінювання використовують стаціонарні та переносні теплозахисні екрани, а також засоби індивідуального захисту: спецодяг з вогнестійких матеріалів, захисні щитки, окуляри, каски, рукавиці та спеціальне взуття. Робочі місця повинні бути обладнані припливно-витяжною вентиляцією для видалення пилу, диму та газів, що утворюються під час розливки.

Безпечна експлуатація мостових і стриперних кранів забезпечується проведенням періодичних технічних оглядів, перевіркою справності стропувальних пристроїв та дотриманням вимог щодо переміщення вантажів. Для зменшення впливу шуму і несприятливого мікроклімату застосовуються засоби шумоізоляції, системи вентиляції та раціональні режими праці й відпочинку. Усі працівники розливного відділення повинні проходити

навчання, інструктажі з охорони праці та регулярні перевірки знань правил безпечного виконання робіт.

4.2.1 Заходи щодо забезпечення безпеки праці під час розливки сталей на МБЛЗ

Безпека праці на машинах безперервного лиття заготовок забезпечується комплексом організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання аварійним проривам металу, впливу високих температур, шуму та рухомих частин обладнання. Одним із найважливіших заходів є автоматизація процесу розливки, що дозволяє мінімізувати перебування персоналу в небезпечних зонах поблизу струмка рідкої сталі та кристалізатора.

Для попередження проривів металу здійснюється постійний контроль параметрів лиття, рівня металу в кристалізаторі, швидкості витягування заготовки та роботи систем вторинного охолодження. Усі рухомі частини обладнання – ролики, правильно-тягові механізми, ножиці та транспортні пристрої – повинні бути обладнані захисними огородженнями, блокувальними пристроями та системами аварійної зупинки.

Для зниження впливу теплового випромінювання використовуються теплозахисні екрани, дистанційне керування технологічними операціями та спеціальний термостійкий спецодяг. Важливе значення мають системи аспірації та вентиляції, які забезпечують видалення пилу, аерозолів оксидів металів і продуктів газокисневого різання. З метою підтримання нормативних параметрів мікроклімату застосовуються системи кондиціонування операторських приміщень та механічна вентиляція виробничих зон.

Для зменшення шкідливого впливу шуму використовуються шумоізоляційні конструкції, а працівники забезпечуються індивідуальними засобами захисту органів слуху. Особлива увага приділяється безпечному виконанню робіт під час заміни проміжних ковшів, занурювальних стаканів та проведення ремонтних операцій. Персонал МБЛЗ повинен проходити

спеціальне навчання, інструктажі та періодичну перевірку знань з охорони праці, а також бути забезпеченим сучасними засобами індивідуального захисту відповідно до чинних нормативних вимог.

4.3 Екологічні аспекти та підвищення безпеки сучасних технологій розливки сталей та сплавів

Сучасний розвиток технологій розливки сталей і сплавів спрямований не лише на підвищення продуктивності та якості металопродукції, але й на зменшення негативного впливу металургійного виробництва на навколишнє середовище. Одним із найважливіших екологічних напрямів є скорочення викидів пилу, газоподібних забруднювальних речовин та парникових газів шляхом впровадження ресурсозберігаючих і маловідходних технологій.

Перехід від розливки металу у виливниці до безперервного лиття заготовок дозволив істотно зменшити обсяги утворення металевих відходів, знизити витрати енергії на нагрівання металу перед прокатуванням та скоротити споживання вогнетривких матеріалів. Завдяки цьому зменшується навантаження на навколишнє середовище та підвищується загальна енергоефективність металургійного виробництва.

Важливим екологічним заходом є впровадження замкнених систем водопостачання, які забезпечують багаторазове використання води для охолодження обладнання та заготовок. Такі системи дають можливість значно скоротити споживання природних водних ресурсів і мінімізувати скидання забруднених стічних вод у навколишнє середовище. Для очищення води застосовуються відстійники, фільтри, гідроциклони та інші сучасні очисні споруди.

Зменшенню екологічного навантаження сприяє використання високоефективних газоочисних установок, рукавних фільтрів та аспіраційних систем, які забезпечують уловлювання пилу й продуктів окиснення металів безпосередньо в місцях їх утворення. Сучасні системи моніторингу дозволяють

здійснювати безперервний контроль параметрів викидів та оперативно реагувати на відхилення від установлених нормативів.

Підвищення рівня виробничої безпеки досягається шляхом широкого впровадження автоматизованих систем керування технологічними процесами. Використання датчиків контролю температури, рівня металу, витрати охолоджувальної води та стану обладнання дозволяє своєчасно виявляти потенційно небезпечні ситуації та запобігати виникненню аварій. Значну роль відіграють цифрові системи діагностики та прогнозування технічного стану обладнання, що забезпечують перехід від аварійних ремонтів до планового технічного обслуговування.

Перспективним напрямом розвитку сучасних технологій розливки є застосування роботизованих комплексів для виконання найбільш небезпечних операцій, пов'язаних із контактом персоналу з високими температурами та рухомим обладнанням. Це дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, знизити ризик виробничого травматизму та покращити умови праці працівників.

У табл. 4.1 представлено основні екологічні та безпекові заходи, що застосовуються в сучасних технологіях розливки сталей і сплавів, а також результати їх впровадження, спрямовані на зниження техногенного навантаження на довкілля, підвищення енергоефективності виробництва та покращення умов праці персоналу.

Дані табл. 4.1 свідчать про те, що сучасні технології розливки сталей і сплавів спрямовані на комплексне підвищення екологічної та виробничої безпеки. Впровадження безперервного лиття заготовок, автоматизованих систем керування, замкнених циклів водопостачання та сучасних газоочисних установок забезпечує скорочення негативного впливу на довкілля, зниження витрат ресурсів і створення більш безпечних умов праці для персоналу металургійних підприємств. Крім того, використання сучасних цифрових технологій моніторингу та контролю технологічних процесів сприяє підвищенню надійності роботи обладнання, зменшенню ризику аварійних

ситуацій та забезпеченню сталого розвитку металургійного виробництва.

Таблиця 4.1 – Основні екологічні та безпекові заходи в сучасних технологіях розливки сталей і сплавів

Напрям удосконалення	Основні заходи	Результат впровадження
Зменшення відходів виробництва	Перехід від розливки у виливниці до безперервного лиття заготовок	Скорочення обрізі, усадкових дефектів та втрат металу
Підвищення енергоефективності	Використання МБЛЗ та ливарно-прокатних агрегатів	Зниження витрат енергії на повторне нагрівання металу
Раціональне використання водних ресурсів	Впровадження замкнених систем водопостачання	Зменшення споживання свіжої води та обсягів стічних вод
Очищення атмосферних викидів	Застосування аспіраційних систем, рукавних фільтрів та газоочисних установок	Зниження концентрації пилу та шкідливих газів у повітрі
Моніторинг екологічних показників	Використання автоматизованих систем контролю викидів	Підвищення екологічної безпеки виробництва
Автоматизація процесів	Автоматичне регулювання рівня металу, температури та швидкості лиття	Зменшення впливу людського фактора та ризику аварій
Технічна діагностика обладнання	Системи контролю стану вузлів та механізмів	Попередження аварійних ситуацій та простоїв
Роботизація небезпечних операцій	Використання роботів для обслуговування обладнання та виконання допоміжних робіт	Зниження рівня виробничого травматизму

4.4 Нормативні документи з охорона праці у розливному відділенні

Система нормативного регулювання охорони праці у розливному відділенні є багаторівневою та охоплює законодавчі акти, галузеві правила, стандарти та локальні інструкції. Її головна мета – мінімізація ризиків при роботі з розплавленим металом, забезпечення безпеки персоналу та стабільності технологічного процесу безперервної розливки сталі.

Нормативне забезпечення охорони праці у розливному відділенні базується на низці ключових законодавчих актів України. Основним документом є Закон України «Про охорону праці», який визначає правові та організаційні засади функціонування системи охорони праці. Він покладає на роботодавця обов’язок створювати безпечні та нешкідливі умови праці, організовувати навчання та інструктажі персоналу, забезпечувати працівників засобами індивідуального захисту, а також своєчасно проводити медичні огляди для попередження професійних захворювань і виробничого травматизму.

Важливе місце також займає Кодекс законів про працю України (КЗпП), який регулює трудові відносини в цілому. У контексті металургійного виробництва він встановлює норми щодо тривалості робочого часу і часу відпочинку, особливості праці у шкідливих і важких умовах, а також передбачає гарантії та компенсації працівникам, зайнятим на небезпечних виробництвах, зокрема у розливних відділеннях, де існує підвищений ризик впливу високих температур і розплавленого металу.

Додатково систему охорони праці у розливному відділенні конкретизує перелік нормативно-правових актів з охорони праці, який охоплює галузеві правила, державні стандарти та санітарні норми. До основних із них належать: НПАОП 27.1-1.01-09 «Правила охорони праці у сталеплавильному виробництві», що регламентують безпечне ведення сталеплавильних процесів і розливання сталі; НПАОП 0.00-1.80-18 «Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і

відповідного обладнання», які визначають вимоги до безпечної експлуатації кранів та транспортування ковшів із розплавленим металом; НПАОП 0.00-7.17-18 «Мінімальні вимоги щодо безпеки і охорони здоров’я при використанні засобів індивідуального захисту працівниками», що встановлюють порядок застосування засобів індивідуального захисту; НПАОП 0.00-7.23-23 «Мінімальні вимоги щодо безпеки працівників у вибухонебезпечних середовищах», які регламентують роботу в умовах можливого утворення вибухонебезпечних газових сумішей; а також НПАОП 27.1-1.09-09 «Правила охорони праці у газовому господарстві підприємств чорної металургії», що встановлюють вимоги до безпечного використання технологічних газів.

Окремо встановлюються санітарні норми та державні стандарти, зокрема ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», які регламентують параметри температури та вологості у гарячих цехах; ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку», що визначають допустимі рівні шумового навантаження від обладнання; ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої вібрації», які регулюють вплив вібрації від машин і механізмів; а також ДСанПіН 3.3.6.096-2002 «Державні санітарні норми при роботі з електромагнітними полями», що встановлюють вимоги до безпеки персоналу при роботі з електромагнітними випромінюваннями обладнання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На сьогоднішній день існує два основні способи розливки сталі – у виливниці та на машинах безперервного лиття заготовок. Вони відрізняються характером організації процесу кристалізації, умовами формування зливка, рівнем автоматизації, продуктивністю та показниками якості готової продукції, і забезпечують отримання сталі у вигляді окремих зливків або безперервнолитих заготовок різного поперечного перерізу (слябів, блюмів, квадратних і круглих заготовок). Різноманіття існуючих технологічних рішень дозволяє обґрунтовано підбирати оптимальний спосіб розливки залежно від хімічного складу сталі, вимог до її якості та конкретних умов металургійного виробництва.

2. Основними проблемами при розливці та кристалізації сталі у виливницях є нерівномірність процесу тверднення, інтенсивна усадка металу та обмежені можливості живлення центральних зон зливка розплавом. Це зумовлює утворення як внутрішніх, так і поверхневих дефектів, зокрема усадкових раковин, осьової пористості, ліквацийної неоднорідності, газових пор і шлакових включень, які суттєво погіршують експлуатаційні властивості металу.

Основними проблемами при безперервній розливці та кристалізації сталі є складність забезпечення стабільного теплового та гідродинамічного режимів у кристалізаторі та зоні вторинного охолодження, а також чутливість процесу до коливань технологічних параметрів. Це призводить до утворення внутрішніх і поверхневих дефектів, таких як поздовжні та поперечні тріщини, заворот кірки, заливини, газові бульбашки, шлакові включення та прориви твердіючої оболонки, що негативно впливають на якість готової заготовки.

3. Металургійна промисловість України поступово переходить від традиційної розливки у виливниці до більш прогресивної технології безперервного лиття заготовок, яка вже широко впроваджена на провідних підприємствах країни та забезпечує підвищення якості продукції, зниження

втрат металу та енергоспоживання.

Аналіз досвіду українських металургійних підприємств показав, що найбільш сучасні виробництва (зокрема ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» та «Інтерпайп сталь») активно модернізують МБЛЗ, впроваджують позапічну обробку сталі, вдосконалюють конструкції обладнання та підвищують рівень автоматизації процесів. Водночас на окремих підприємствах ще використовується застаріла технологія розливки у виливниці, що поступається за ефективністю сучасним методам.

4. Світові тенденції розвитку металургії свідчать про практично повне домінування безперервного лиття, рівень впровадження якого у розвинених країнах перевищує 95–98 %. Провідні компанії Німеччини, Австрії, Японії, Китаю та США впроваджують високопродуктивні багаторучайні МБЛЗ, цифрові системи керування процесами, інноваційні кристалізатори та технології керованого охолодження, що забезпечує високу якість металопродукції та стабільність процесу.

5. Встановлено, що розвиток ливарно-прокатних агрегатів та тонкослябових технологій є одним із найперспективніших напрямів інтеграції процесів лиття та прокатки, що дозволяє значно скоротити енерговитрати, підвищити продуктивність і зменшити собівартість продукції. Порівняльний аналіз підтвердив переваги безперервного лиття над розливкою у виливниці як за технологічними, так і за якісними та економічними показниками.

6. Перспективи розвитку розливки металів і сплавів пов’язані з подальшою цифровізацією виробництва, впровадженням інтелектуальних систем керування МБЛЗ, удосконаленням конструкцій обладнання, розвитком екологічно безпечних технологій та переходом до ресурсоефективної «зеленої металургії». Загалом сучасні тенденції спрямовані на підвищення ефективності, автоматизацію та забезпечення стабільної якості металопродукції при мінімальному впливі на навколишнє середовище.

7. У результаті виконаних розрахунків було визначено основні параметри процесів розливки сталі як у виливниці сифоном, так і на машинах

безперервного лиття заготовок. Проведений гідравлічний розрахунок сифонної літникової системи дозволив встановити необхідну висоту літникового каналу та діаметр центрової, що забезпечують надійне і рівномірне заповнення виливниць рідкою сталлю з мінімальними втратами напору. Отримані значення відповідають рекомендованим технологічним нормам і створюють умови для одержання якісних зливків.

Для заданої річної продуктивності сталеплавильного цеху 1,2 млн. т на рік виробництва підшипникових сталей обґрунтовано вибір типу машин безперервного лиття заготовок. Визначено оптимальну швидкість розливки, тривалість повного затвердіння заготовки, протяжність зони вторинного охолодження та тривалість виробничого циклу МБЛЗ. Розрахунок показав, що для забезпечення необхідного обсягу виробництва доцільно встановити три криволінійні МБЛЗ, які забезпечують необхідну продуктивність із коефіцієнтом використання потужності близько 0,88.

8. Проведено аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів у розливному відділенні (зокрема в умовах розливки у виливниці та на МБЛЗ). Встановлено, що умови праці характеризуються високим рівнем теплових, механічних, хімічних і фізичних навантажень на персонал, що створює значні ризики виробничого травматизму. Водночас впровадження комплексних організаційних і технічних заходів, автоматизації технологічних процесів, використання засобів колективного та індивідуального захисту, а також дотримання вимог чинних нормативно-правових актів України забезпечує суттєве зниження цих ризиків і підвищення безпеки праці.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. 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.

2. Воденнікова О. С. Теорія та технологія розливки і кристалізації сталі : конспект лекцій для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія». Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 117 с.

3. Воденнікова О. С. Розливка сталі та спеціальні модифікатори, лігатури : конспект лекцій для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія». Запоріжжя : ЗНУ, 2021. 156 с.

4. 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

5. Воденнікова О.С., Воденнікова Л.В., Сучасний стан, проблеми та перспективи безперервної розливки сталі в Україні. Матеріали XXII науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА. Том І. Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості (23–27 жовтня 2017 р.). Запоріжжя : ЗДІА, 2017. С. 11.

6. Тарасов В. К., Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Манідіна Є. А. Удосконалення методів підготовки виливниць до розливки сталі. *Метал та лиття України.* 2021. Т. 29. № 3. С. 28–35.

7. Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Манідіна Є. А. Застосування кріогенного бластінгу як сучасного методу очищення від забруднень виливниць для розливки сталі. *Метал та лиття України*. 2021. Т. 29. № 4. С. 85-91.

8. Воденнікова О. С., Воденников С. А., Манідіна Є. А. Сучасні способи підготовки виливниць до розливки сталі. *Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України* : тези доповіді ІІ міжнародної

науково-практичної онлайн-конференції (Київ, 16 червня 2021 р.). Київ : ІТТА, 2021. С. 362–366.

9. Воденніков С. А., Падалка В. П., Воденнікова О. С. Технологія розливання і кристалізація сталі : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА спеціальність 6.090401 «Металургія чорних металів». Запоріжжя :, Видавництво Запорізької державної інженерної академії, 2011. 186 с.

10. METINVEST. Розлив сталі: особливості процесу. URL: https://metinvestholding.com/ua/media/article/razlivka-stali-osobennosti-processa (дата звернення: 02.06.2026)

11. Розливання сталі на злитки. URL: https://stud.com.ua/36309/tovaroznavstvo/rozlivannya_stali_zlitki (дата звернення: 02.06.2026)

12. Лукашенко Р. В., Воденнікова О. С., Воденнікова Л. В. Дослідження технології суспензійної розливки марганцевих сплавів. Матеріали XXIV науково-технічної кон-ференції студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів. Т 1. Металургія як основа сучасної промисловості (Запоріжжя, 26–29 листопада 2019 р.). Запоріжжя: ІІ ЗНУ, 2019. С. 36–37.

13. Шляхи розвитку «зеленої металургії». Частина 3. Ливарно-прокатні модулі. URL: https://metinvest-smc.com/ua/articles/sliaxi-rozvitku-zelenoyi-metalurgiyi-castina-3-livarno-prokatni-moduli/?srsltid=AfmBOoqDsFe0DGaZiYcdiUDiXGcURuDRSps0TDg_Da7JwHX3JudPGbmK (дата звернення: 02.06.2026)

14. Машина безперервного лиття допомагає підвищити ефективність лиття сталі. URL: https://ua.sinorolling.com/news/the-continuous-casting-machine-helps-to-improv-83367492.html (дата звернення: 02.06.2026)

15. NKZM. Сортові МБЛЗ. URL: http://nkmz.com/ua/spojivachevi/mo-2-ua/sortovie-mnlz-ua/ (дата звернення: 02.06.2026)

16. LMM GROUP. Properties And Considerations Of Manufacturing By Continuous Casting. URL: https://www.lmmgroupcn.com/hi/properties-and-considerations-of-manufacturing-by-continuous-casting/ (дата звернення:

02.06.2026)

17. Continuous Casting Machine (CCM). URL: https://www.sme-group.com/ru/plant/%D0%BD%D0%B5%D0%BF%D1%80%D0%B5%D1%80%D1%8B%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D0%B5-%D0%BB%D0%B8%D1%82%D1%8C%D0%B5 (дата звернення: 02.06.2026)

18. Падалка В. П., Воденнікова О. С. Розливка і кристалізація сталі : методичні вказівки до контрольної роботи, практичних та самостійних занять для студентів ЗДІА спеціальності 6.090401 «Металургія чорних металів» денної та заочної форм навчання. Запоріжжя: ЗДІА, 2009. 59с.

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

20. 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.

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

22. 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: 07.06.2026)

23. Кодекс законів про працю України {Затверджується Законом № 322-VIII від 10.12.71 ВВР, 1971, додаток до № 50, ст. 375}. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/322-08#Text (дата звернення: 02.06.2026)

24. НПАОП 27.1-1.01-09. Правила охорони праці у сталеплавильному виробництві ; прийнятий 15.10.2009 р. ; чинний від 05.11.2009 р.

25. 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.

26. НПАОП 0.00-7.17-18. Мінімальні вимоги щодо безпеки і охорони здоров’я при використанні засобів індивідуального захисту працівниками ; прийнятий 27.11.2018 р. ; чинний від 27.11.2018 р.

27. НПАОП 0.00-7.23-23. Мінімальні вимоги щодо безпеки працівників у вибухонебезпечних середовищах ; прийнятий 12.05.2023 р. ; чинний від 06.10.2023 р.

28. НПАОП 27.1-1.09-09. Правила охорони праці у газовому господарстві підприємств чорної металургії ; прийнятий 29.12.2009 р. ; чинний від 19.02.2010 р.

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

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

31. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої вібрації ; затверджений 01.12.1999 р. ; чинний від 01.12.1999 р.

32. ДСанПіН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми при роботі з електромагнітними полями ; затверджений 18.12.2002 р. ; чинний від 18.12.2002 р.

33. 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.

34. 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.