Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне 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 бакалавра

рівень вищої освіти__перший (бакалаврський) рівень_____

на тему «Моделювання процесу безперервного лиття заготовок під час їх кристалізації»

Виконав: студент _4_курсу, гр. *6.1362-м*
___Єремеєв Олександр Володимирович
(ПІБ) (підпис)
спеціальності
____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)
спеціалізація
_____
(шифр і назва)
освітньо-професійна програма
*Металургія*__
(шифр і назва)

Керівник _Скачков В.О._____
(прізвище та ініціали) (підпис)
Рецензент _Бєлоконь Ю.О._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2026 року

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

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський) рівень*

Спеціальність *136 металургія*
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма *металургія*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*
Ю.О. Бєлоконь

"____" _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Єремеєву Олександру Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) Моделювання процесу безперервного лиття заготовок під час їх кристалізації
керівник роботи (проєкту) *Скачков Віктор Олексійович, д-р. т. н., проф.*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "23" грудня 2025 року № 1831-с
2. Строк подання студентом роботи (проєкта) *28.05.2026 р.*
3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *науково-технічна література, періодичні видання за фахом, патентний пошук.*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*: .1 Сучасні процеси та установки безперервного лиття та обробки металів тиском. 1.2 Особливості напівбезперервного лиття.1.3 Моделювання процесу розливання безперервного розливання. 2.1 Аналіз методів розрахунку теплових процесів. 2.2 Дослідження теплообміну під час розливання на установці з горизонтальним кристалізатором. 2.3 Конструкція та принцип роботи установки.3.1 Оцінка процесів формування мікроструктури чавуну. 3.2 Регресійний аналіз процесів формування та оптимізації структури чавуну. 3.3 Оцінка впливу структурно-фазових компонентів на функціональні властивості чавунних виливків. 4.1 Шкідливі та небезпечні фактори виробничого середовища*
4. *Презентаційний матеріал 11 слайдах (на 11 сторінках)*

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
1. Аналіз методів безперервного розливання та моделювання теплових процесів	*Скачков В.О., професор кафедри*	
2. Розрахунки теплових процесів при безперервному розливанні чавуну	*Скачков В.О., професор кафедри*	
3. Процеси безперервного розливання чавуну: формування структури та властивостей	*Скачков В.О., професор кафедри*	
4. Охорона праці та техногенна безпека	*Скачков В.О., професор кафедри*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., зав. кафедри*	

7. Дата видачі завдання: *01.02.2026 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Аналіз методів безперервного розливання та моделювання теплових процесів*		
2	*Розрахунки теплових процесів при безперервному розливанні чавуну*		
3	*Процеси безперервного розливання чавуну: формування структури та властивостей*		
4	*Охорона праці та техногенна безпека*		

Студент _____ *Єремеєв О.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ *В.О. Скачков*
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи: 68 с., 4 частини, 193 рисунків, 4 таблиць, 36 посилань.

ЛИТТЯ, СПЛАВ, МЕТАЛ, КРИСТАЛІЗАЦІЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ФАЗА, СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ, ОХОЛОДЖЕННЯ

Тема диплома: «Моделювання процесу безперервного лиття заготовок під час їх кристалізації»

Мета роботи – аналіз методів та механізмів безперервного розливання металів та сплавів.

Розглянуто підходи до моделювання процесів безперервного розливання. Наведено методи теплових розрахунків в умовах безперервного розливання. Показано розподіл твердої фази у процесі кристалізації розплавів. Розглянуто технологію розливання та пресування на встановлення горизонтального типу. Показано особливості затвердіння розплавів металів та сплавів в умовах з різними швидкостями розливання та охолодження. Проведено аналіз мікроструктури сплавів на основі заліза у процесі безперервного лиття. Встановлено залежності функціональних властивостей сплавів від умов охолодження, товщини стінок виливків та зон охолодження.

В розділі охорона праці та техногенна безпека Встановлено основні джерела створення шкідливих та небезпечних умов на робочих місцях у ливарному цеху. Розглянуто можливі методи захисту від впливу небезпечних факторів: електротравматизму, термічних ушкоджень та пожежної небезпеки.

ВСТУПвы

Перспективи розвитку промисловості передбачають подальше підвищення ефективності та якості виливків, що виготовляються, на базі комплексного використання прогресивних технологічних процесів. Удосконалення існуючих та створення нових спеціальних способів лиття можливе на базі сучасних досягнень фундаментальних та загальнотехнічних наук.

Істотні переваги безперервних методів лиття зумовили високий інтерес фахівців у галузі ливарного виробництва до розробки та використання цих процесів для отримання литих заготовок у машинобудуванні. Збільшення виходу придатного лиття до 85 – 90%, зниження припусків на механічну обробку, поліпшення якості заготовок, можливість автоматизації та механізації виробництва, поліпшення умов праці, сприяють значному розширенню сфери застосування безперервних методів лиття з різних металів та сплавів. На підставі аналізу існуючих способів визначено найбільш перспективні принципові схеми лиття заготовок деталей машино- та верстатобудування.

Безперервно-циклічне лиття наморожуванням дозволяє отримувати виливки із заданими структурою та фізико-механічними властивостями за рахунок спрямованого затвердіння та термообробки, об'єднаних у єдиний технологічний процес.

Розроблено високоефективне устаткування реалізації горизонтального безперервного лиття. На установках отримують суцільні та порожнисті заготовки широкого сортаменту із чорних та кольорових металів та сплавів.

1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ

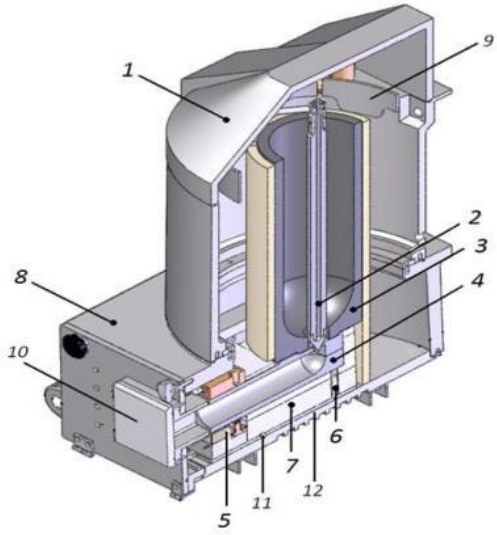
1.1 Сучасні процеси та установки безперервного лиття та обробки металів тиском

На сьогоднішній день для отримання злитків та подальшої їх обробки тиском використовують безперервне лиття, при якому злиток може бути отриманий будь-якої необхідної довжини. При цьому кристалізатор залишається нерухомим, а злиток витягується із заданою швидкістю. Рівень рідкого металу в кристалізаторі підтримується постійним, а відлитий злиток ріжеться на мірні заготовки спеціальними пристроями, що рухаються синхронно зі швидкістю витягування зливка.

Напівбезперервне лиття відрізняється від безперервного тим, що воно ведеться безперервно тільки до отримання зливка заданої довжини, після чого лиття припиняється, зливки витягуються і цикл повторюється. Даний тип лиття зручний при виробництві дрібносерійної продукції, що має відносно невеликий поперечний переріз. Російськими вченими розроблено горизонтальну машину напівбезперервного лиття заготовок для дрібносерійного виробництва (ГМПЛЗ) представлену на (рис 1.1) [1].

Авторами конструкції даної установки розроблено з'єднувальний вузол тигля з кристалізатором, що дозволяє створити надійне з'єднання двох елементів у ході підготовки машини до початку процесу лиття та запобігти витіканню розплавленого матеріалу камеру кристалізатора. Сконструйовано витяжний пристрій, що здійснює контрольовану витяжку всього сортаменту, що розливається, за заздалегідь обраною програмою. Кристалізатор виконаний з внутрішньою робочою порожниною, що забезпечує рівномірне тепловідведення від усіх граней заготівлі, що відливається. Також представлена конструкція охолоджуючого пристрою,

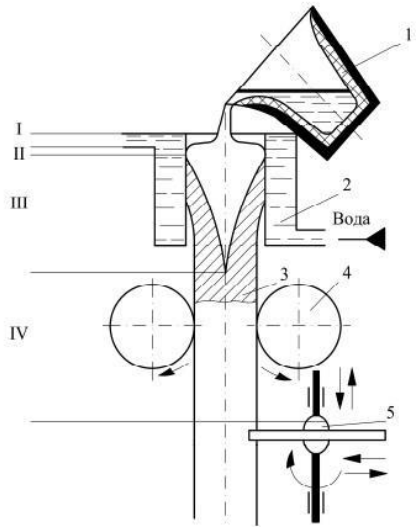
що служить для вирівнювання температури заготівлі, як її товщиною, так і шириною, що дозволяє отримати рівномірну структуру виробів [1].



1 – кришка корпусу індуктора; 2 – шток; 3 – графітовий тигель; 4 – графітовий кристалізатор; 5 - охолодний пристрій; 6 – керамічні втулки; 7 – ізоляційний матеріал; 8 – камера кристалізатора; 9 - підйомний пристрій; 10 – оглядова кришка; 11 - санки; 12 - дно корпусу

Рисунок 1.1 – Плавильна та охолоджувальна частини машини ГМПЛЗ

Процес безперервного лиття здійснюється в такий спосіб (рис. 1.2).



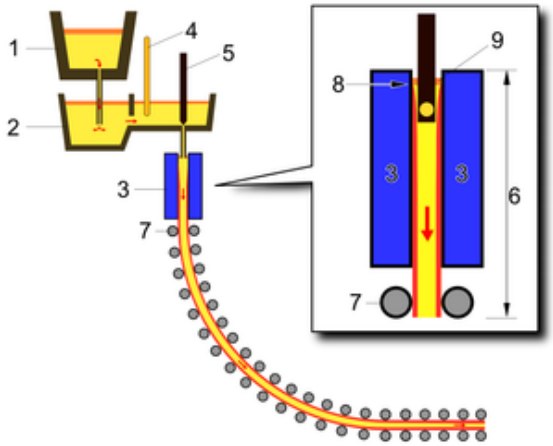
1 – ківш, 2 – кристалізатор, 3 – затверділа частина розплаву, 4 – валки, 5 – різак, I – IV – зони охолодження

Рисунок1.2 – Схема безперервного лиття

Розплав рівномірно і безперервно подається у водоохолоджуваний кристалізатор. Затверділа частина зливка безперервно витягується валками або опускається під дією власної ваги. Особливості процесу формування безперервної виливки обумовлені тим, що в кристалізаторі в різних його зонах по висоті в кожний момент одночасно відбуваються всі послідовні стадії охолодження та затвердіння розплаву: I – заповнення кристалізатора розплавом; II – відведення теплоти перегріву; III – кристалізація; IV – охолодження зливка [2].

Широке поширення у вітчизняному виробництві продукції із чорних металів набула машина безперервного лиття заготовок (МНЛЗ), схема якої представлена на (рис.1.3) [3].

У даній конструкції рідкий метал безперервно заливається в кристалізатор, що охолоджується, безпосередньо з ковша або через проміжний пристрій. При цьому кристалізатор попередньо вводять затравку однакового поперечного перерізу, що і у зливка. У процесі затвердіння заготовка, що відливається, витягується вниз за допомогою використання тягнуть механізмів.



1 – ківш подачі рідкого металу; 2 – проміжний ківш; 3 – кристалізатор; 4 – заслінка; 5 – стопор; 6 – зона кристалізації; 7 – ролики, що тягнуть; 8 – зона початку кристалізації; 9 - подача охолоджувальної води

Рисунок 1.3 – Схема встановлення безперервного лиття заготовок

До основних техніко-економічних переваг МНЛЗ слід зарахувати:

– невелика витрата металу на тонну готової продукції;

– зменшення відходів донної та головної частин злитків;

– малі капітальні та експлуатаційні витрати;

– механізація та автоматизація технологічного процесу.

Основними недоліками установки МНЛЗ є утруднення виготовлення виливків складної конфігурації, а також обмежена номенклатура виливків та заготовок [4].

Найбільш прогресивним процесом обробки металів тиском, що дозволяє отримувати деформовані вироби, є пресування. Широкий розвиток пресування пояснюється сприятливою схемою напруженого стану металу, що деформується - всебічним нерівномірним стисненням [5,6].

Існує досить багато схем пресування, але основними їх слід вважати пряме і зворотне [2]. При прямому пресуванні напрямок видавлювання виробів збігається з напрямом руху прес-штемпеля. При зворотному пресуванні витікання металу в матрицю відбувається в напрямку, протилежному руху прес-штемпеля.

В даний час пресуванням отримують кілька десятків тисяч найменувань прес-виробів з різних металів та сплавів. При цьому процес ведуть у широкому інтервалі температур, вибір яких визначається головним чином величиною опору деформації. Гаряче пресування поширеніше, ніж холодне [6]. При цьому сфера застосування останнього розширюється для металів і сплавів, що мають невисокий опір деформації. Пресування організоване як процес, що періодично повторюється, проте в даний час знайшли промислове застосування способи пресування в безперервному і підлозі - безперервному режимах.

Для реалізації низки безперервних процесів виробництва довгомірної продукції як базовий процес застосовується прокатка, основною перевагою якої є можливість здійснення за допомогою обертових валків безперервного процесу деформації [7].

1.2 Особливості напівбезперервного лиття

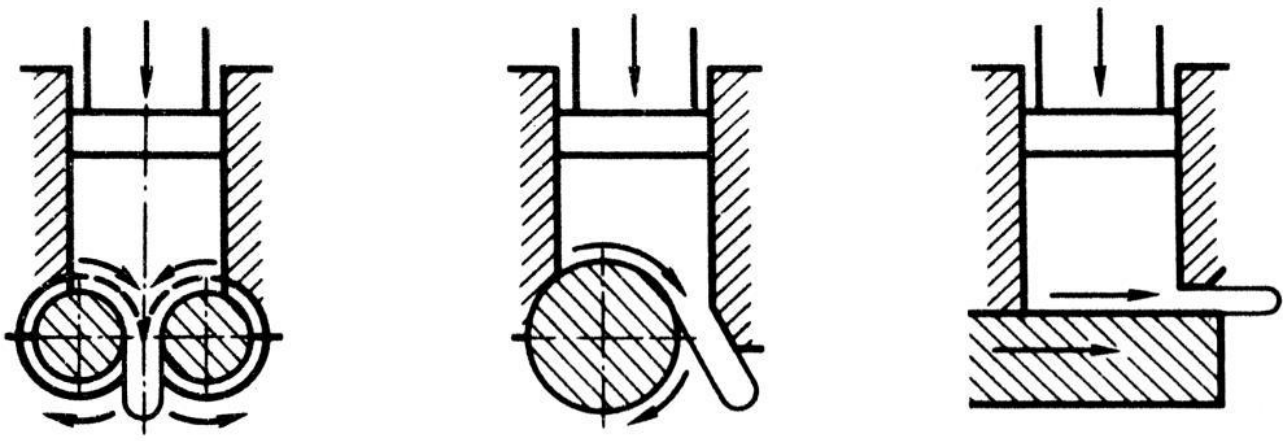
Напівбезперервне пресування в даний час є однією з основних схем виробництва широкої номенклатури прес-виробів із алюмінієвих сплавів. При цьому його характерною рисою є використання форкамерного інструменту, що дозволяє здійснювати пресування зі стиковим зварюванням та натягом [8]. Як основне обладнання для реалізації таких технологій застосовуються горизонтальні преси, основними параметрами яких є велике номінальне зусилля, розміри контейнера, хід та швидкість руху пресуючої траверси. Основною тенденцією розвитку гідропресового обладнання є застосування автоматизованих ліній, оснащених пристроями, що тягнуть, новими системами передачі продукції [9].

В даний час найбільш поширена схема прямого пресування на гідравлічних пресах внаслідок відносної простоти її здійснення та можливості виготовлення профілів, панелей, прутків та труб практично будь-якої конфігурації з високою якістю поверхні. Однак через суттєвий опір дії сил тертя в контейнері процес характеризується значною нерівномірністю течії металу, що обмежує граничні швидкості закінчення, що знижує продуктивність пресових установок, призводить до отримання виробів з неоднорідною структурою та зниження виходу придатної продукції [4]. Але в існуючих способах пресування на гідравлічних пресах після кожного циклу пресування залишаються відходи металу як пресзалишок, а циклічність призводить до зниження продуктивності процесу.

У роботе [6] розглянуто можливі схеми пресування з використанням сил тертя на контакті металу, що деформується, з елементами матричного вузла (рис. 1.4): поздовжнє пресування через валкову матрицю з примусовим обертанням (а); кутового пресування через матрицю, утворену примусово обертається валком і калібруючою кромкою контейнера (б); бічного пресування через матрицю, утвореного торцевою плитою тертя та

калібруючою кромкою контейнера (в). Схема (а) випробувана у промислових умовах [12], а схеми (б) і (в) знайшли неповне застосування в машинах та процесах Conform та Linex, а також у [13].

В останні роки набули розвитку технології та обладнання безперервного пресування, які дозволяють вирішувати деякі із зазначених проблем шляхом реалізації необхідного ступеня деформації в одному вузлі – вузлі безперервного деформування. При цьому, поряд з основним видом обробки - пресуванням, в осередку деформації в залежності від виду безперервного пресування можуть поєднуватись такі операції, як прокатка, осад, роздача та ін. Основними способами безперервного пресування є Conform, Linex і Extrolling. У роботах [10-12] наведено аналіз технології та обладнання безперервного пресування, а також результати досліджень у цій галузі.

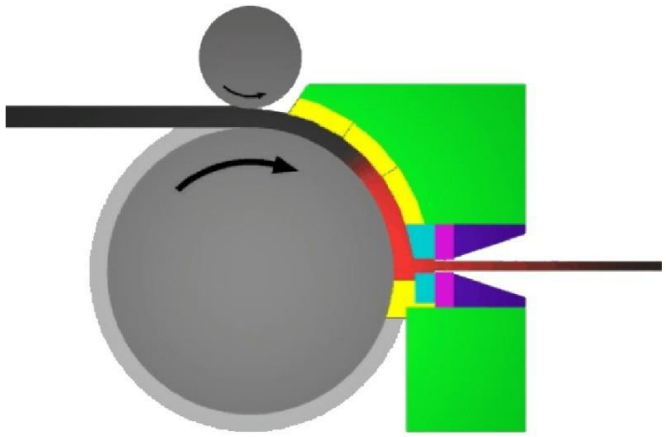


а – з боку валкової матриці; б – одного валка, в – плити тертя

Рисунок1.4 – Пресування з активною дією сил тертя

Найбільшого поширення в промисловості отримав спосіб Конформ, запропонований Д. Грін [14] в 1970 р (GB). Спосіб Конформ, схема якого наведена на рис. 1.5, заснований на застосуванні рухомого інструменту, що обертається у вигляді колеса з врізаною канавкою і примикає до нього нерухомого інструменту, званого черевиком, причому в торці черевика встановлена матриця, яка перекриває канавку колеса. В якості заготовки

використовується пруток 7, який подається в струмок 2, виконаний на робочому колесі 1 у вигляді кільцевої канавки і з зовнішньої сторони закритий башмаком притискним 3, на внутрішній поверхні якого виконаний виступ 4, що охоплює заготовку 7. У башмаку 3 закріплений блок інструменту з пресової матриць.



1 – робоче колесо, 2 – кільцева канавка, 3 – башмак, 4 – кільцева вставка, 5 – вставка, 6 – матриця, 7 – заготовка, 8 – виріб, 9 – валок

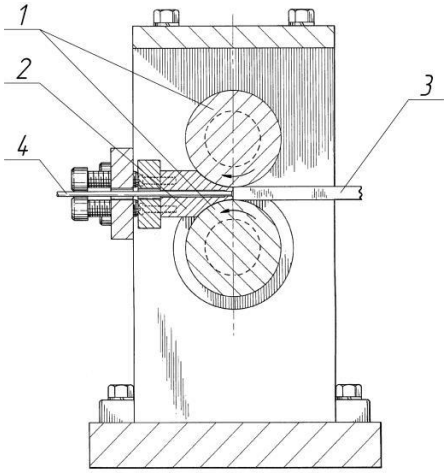
Рисунок 1.5 – Принципова схема реалізації процесу безперервного пресування за способом Конформ [15]

При подачі пруткової заготовки в зазор між черевиком і колесом, вона просувається в камеру пресування, утворену поверхнями черевика і канавки, під дією сил тертя по поверхні контакту з колесом, що обертається і досягає матриці. У зоні безпосередньо перед матрицею заготівля піддається інтенсивному пластичному деформуванню за рахунок якого розігрівається до високих температур і заповнює весь перетин канавки; це сприяє збільшенню сил тертя між поверхнею канавки та заготівлею. При обертанні колеса сили тертя від стінок канавки створюють у заготовці поздовжні сили, необхідні видавлювання матеріалу заготовки через отвір у матриці. Зона неповного контакту заготовки з поверхнею канавки (зона первинного захоплення) служить для розвитку тиску, необхідного для пластичного деформування матеріалу та заповнення об'єму в зоні перед

матрицею. Як заготівлі можна використовувати звичайну дріт, причому процес її деформування - втягування в камеру пресування в міру повороту колеса, попереднє профільування і заповнення канавки в колесі, створення робочого зусилля і, нарешті, пресування - безперервно, тобто. реалізується технологія безперервного вичавлювання. Даний спосіб дозволяє видавлювати прес-вироби, як у напрямку обертання робочого колеса (тангенціальний спосіб), так і в напрямах, паралельних осі робочого колеса (радіальний спосіб).

На сьогоднішній день вітчизняні вчені активно працюють над створенням ефективних та економічних установок, що працюють за способом Конформ. У статті [12] автори розглядають модернізований спосіб безперервного пресування на установці Мульті-РКУП-Конформ.

Процес Екстролінг був запропонований і запатентований Б. Авітцуром у 1976 році і є способом поєднання процесів прокатки та пресування в одному осередку деформації. Характеризується тим, що за рахунок активних сил контактного тертя між валками та заготівлею, видавлювання здійснюють через пресову матрицю. Схема процесу показана (рис. 1.6).



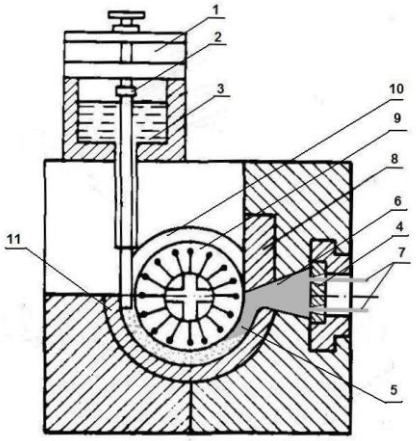
1 – робочі валки; 2 – матриця; 3 – заготівля; 4 – виріб

Рисунок 1.6 - Схема комбінування пресування з прокаткою Екстролінг (пат. № 3934446 US)

Для здійснення процесу вихідна заготовка безперервно подається в калібр, обтискається в ньому, що повністю відповідає стадії прокатки та

видавлюється в отвір, що калібрує, матриці, встановленої на виході з калібру. Даний спосіб реалізується як у холодному стані, так і при підвищених температурах і має менші втрати потужності на тертя реактивної дії, а також більш ефективне заповнення порожнини калібру металом заготовки. Цей процес поєднує в собі низькі втрати на тертя і малу тривалість обробки, характерні для прокатки, з високим одиничним обтисканням, можливим при пресуванні. Недоліки прокатки (невелике одиничне обтиснення) і пресування (обмежена довжина виробу, що одержується) при такій реалізації процесу можуть бути усунені [5,6].

Перший агрегат, що поєднує безперервний процес лиття і пресування, був розроблений з використанням машини Конформ, оснащеної елементами роторного кристалізатора Іларіо Проперці [17]. Цей спосіб виготовлення прес-виробів запатентовано Англії під назвою Castex [18]. Схема процесу безперервного лиття та пресування Conform-Castex представлена на (рис.1.7).



1 – дозатор; 2 – пристрій регулювання витрати рідкого металу; 3 – рідкий метал; 4 – матриця; 5 – фронт кристалізації; 6 -камера зварювання; 7 – порожнисті профілі; 8 – упор; 9 – колесо; 10 – кільцева канавка; 11 - кільцева вставка

Рисунок 1.7 – Схема процесу безперервного пресування Conform-Castex порожнистих профілів з рідкого металу

Перед початком процесу метал повинен затвердіти і накопичитися в камері пресового черевика, що закриває всю нижню половину колеса-кристалізатора, де буде досить високий тиск для випресовування металу через матрицю. Розплавлений метал підводиться через ливарний струмок з регулятором наповнення і надходить у канавку колеса, що має інтенсивне внутрішнє охолодження. В результаті охолодження відбувається безперервне затвердіння металу в нижній частині та з боків струмка. Твердий метал збирається перед упором, зупиняється та відпресовується за способом Conform. Дуже важливо, щоб процес затвердіння металу не захопив зону пресування, а відбувався лише в нижніх шарах та з боків струмка. Висока швидкість затвердіння дозволяє отримати добрі металургійні властивості напівфабрикатів.

Спосіб безперервного лиття та пресування Conform-Castex, при якому рідкий метал заливається в установку, є економічним способом отримання стандартного дроту або профілів з інших способів виготовлення аналогічних виробів з твердого металу шляхом деформації [19]. Стабільність та стійкість процесу безперервної кристалізації рідкого металу та його пресування багато в чому залежать від ефективної роботи системи безперервної подачі розплавленого металу в канавку робочого колеса. Вона має відповідати таким вимогам:

– розплавлений метал не твердне у початковій фазі процесу;

– швидкість переміщення розплавленого металу стала і відповідає швидкості його затвердіння, що визначається інтенсивності тепловідведення від пресового інструменту;

– у потоці розплавленого металу має бути виключено турбулентність.

Використання цієї установки викликає труднощі у дотриманні цих вимог, зокрема, у стабілізації подачі металу в інструмент, внаслідок «наморожування» рідкої фази розплаву при затвердінні на вхідну частину кільцевої нерухомої вставки.

1.3 Моделювання процесу розливання безперервного розливання комбінованим методом

В даний час широко проводяться дослідження , спрямовані на підвищення якості металу , що відливається безперервним способом. У зокрема це стосується якості сталей для залізничних рейок . Залізничний транспорт активно розвивається по всьому світу, водночас зростають і вимоги до рейок . Найкращі рейки сьогодні виробляють у Японії на Nippon Steel [20]. На території України також продовжують використовувати рейки зі сталі М76, К76 із вмістом вуглецю до 0,8%. У теж час у світі все ширше застосовуються рейки з гіперевтектоїдних сталей із вмістом вуглецю значно перевищує 0,8% [20].

Зазначимо також , що самі високі вимоги щодо механічним властивостям термозміцнених рейкових сталей для швидкісного руху поступаються вищенаведеним гіперевтектоїдним сталям із вмістом вуглецю понад 1%.

Цілком очевидно, що в гіперевтектоїдних сталях ліквацийні процеси проходять значно інтенсивніше у порівнянні з традиційними марками рейкових сталей, а отже , отримання якісною безперервнолитої заготівлі з цих сталей вимагає не тільки особливого уваги , але й особливих технологічних прийомів. Попередні результати випробувань комбінованого способу безперервний розливання МНЛЗ + ЕШП [2, 3] дозволили припустити , що цей спосіб може бути успішно застосований і для розливання гіперевтектоїдних рейкових сталей. Запропонований спосіб , що поєднує безперервну розливку та електрошлаковий процес для нагрівання що розливається металу та підтримання сприятливого температурного режиму в кристалізаторі розширити діапазон швидкостей розливання металу та знизити осьову ліквацію в безперервнолитій заготівлі . Заснований він на застосуванні струмопідвідника кристалізатора як кристалізатора МНЛЗ. Зазначимо , що ідея електрошлакового обігріву

металу в кристалізаторі МНЛЗ вперше була запропонована Б. І. Медоваром та його соратниками ще на першому етапі розвитку безперервний розливу та електрошлакового переплаву.

У роботі [4] представлена схема електрошлакового обігріву металу в кристалізаторі МНЛЗ невитратними (графітовими) електродами .

Ідея базувалася на тому, щоб за рахунок додаткового тепла електрошлакового процесу_добитися зниження осьовий неоднорідності безперервнолитого зливка . На той час ідея поєднання МНЛЗ та ЕШП не знайшла застосування . Тим не менш , навіть за нинішнього розвитку методів електромагнітного впливу на рідкометалеву серцевину безперервно відливається зливка досягти придушення осьовий ліквації вдається далеко не авжди , особливо при розливанні сталей з протяжною двофазний зоною . Тому при пошуку методів придушення ліквації в гіперевтектоїдних рейкових сталях припустили , що зниження швидкості розливання може допомогти в цьому . Однак добре відомо і те, що зниження швидкості безперервний розливання неможливо нижче деякого порога, що визначається в кінцевому результаті конструкцією даної машини безперервний розливання та маркою що розливається . При зниженні швидкості нижче цього умовного порога відлити безперервно злиток з гарною поверхнею неможливо . Застосування електрошлакового обігріву може знизити вказаний поріг мінімальної швидкості розливання , а значить і дозволити зменшити осьову неоднорідність зливка .

Досліди щодо застосування струмопідвідника кристалізатора для безперервної та напівбезперервної розливання рідкого металу проводили в лабораторних умовах Інституту електрозварювання їм . Є. О. Патона (ІЕС) з використанням кристалізаторів з внутрішнім діаметром 110, 180, 215 та 350 мм, а 620 мм - в умовах . заводу спецелектрометалургії ІЕС». Проводили їх як із звичайними вуглецевими сталями, так і з інструментальними типу Х12МФ та легованими типу Х18АГ18. Ці досліди підтвердили припущення про можливість зниження центральної

неоднорідності зливка за рахунок зменшення швидкості розливання . Математичне моделювання зміни глибини двофазний зони круглого безперервнолитого зливка вуглецевої сталі провели використовуючи традиційні підходи .

Диференційне рівняння теплопровідності для круглого безперервно відливається зливка в циліндричній системі координат має наступний вид:

$$C(T)\rho\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (1.1)$$

де C , ρ, λ — теплоємність , щільність та теплопровідність відповідно .

Граничні умови в кожній з різних областей теплопередачі між безперервно відливають злитком та різними технологічними

елементами та зонами всіх частин машини безперервного лиття визначаються наступними виразами :

на поверхні шлаковий суміші в кристалізаторі:

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{\Omega_1} = q_{slag}; \quad (1.2)$$

на осі безперервно відливається зливка:

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\Omega_2} = 0;$$

у зоні щільного прилягання скоринки злитка до стінці кристалізатора:

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\Omega_3} = \alpha_1(T - T_m); \quad (1.3)$$

у зоні зазору між скоринкою зливка та кристалізатором:

$$-\lambda\frac{\partial}{\partial}\Big| \quad = \alpha_2(T - T_m) + \sigma_0\varepsilon_s(T^4 - T_m^4); \quad (1.4)$$

у зонах вторинного охолодження водно- повітряної сумішшю :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\Omega_5} = \alpha_3(T - T_w) + \sigma_0 \varepsilon_{Me}(T^4 - T_w^4); \quad (1.5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\Omega_6} = \alpha_4(T - T_w) + \sigma_0 \varepsilon_{Me}(T^4 - T_w^4); \quad (1.6)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}\Big|_{\Omega_7} = \alpha_5(T - T_w) + \sigma_0 \varepsilon_{Me}(T^4 - T_w^4); \quad (1.7)$$

наприкінці витягування безперервного зливка :

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}\Big|_{\Omega_8} = \sigma_0 \varepsilon_{Me}(T^4 - T_0^4); \quad (1.8)$$

у зоні затравки:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{\Omega_9} = 0, \quad (1.9)$$

де $\sigma_0 = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт / (м2 · К4) - Постійна Стефана - Больцмана;

ε_{Me} , ε_s - ступінь чорноти поверхні зливка та кристалізатора відповідно;

α - коефіцієнт тепловіддачі;

q slag - тепловий потік на поверхні невитратного електрода;

T_0 - Температура навколишнього середовища;

Tw - Температура охолоджуючої води;

T m - Температура поверхні кристалізатора;

$\Omega_{1\text{-}9}$ - відповідає становищу поверхонь та/або осей теплопередачі від осі зливка до його поверхні в різних зонах по висоті кристалізатора та умовним чотирьом зонам вторинного охолодження .

Теплоємність зливка з урахуванням прихованої теплоти затвердіння визначали за наступною залежності:

$$C = \begin{cases} C_L & T > T_L \\ fC_s + (1-F)C_L + \frac{L}{T_L - T_S} & T_S \le T \le T_L, \\ C_S & T < T_S \end{cases} \quad (1.10)$$

де C_S , C_L - теплоємність металу в твердому та рідкому стані;

L – теплота фазового переходу;

f = (T - TS) / (TS - TL) - частка твердої фази в двофазній зоні.

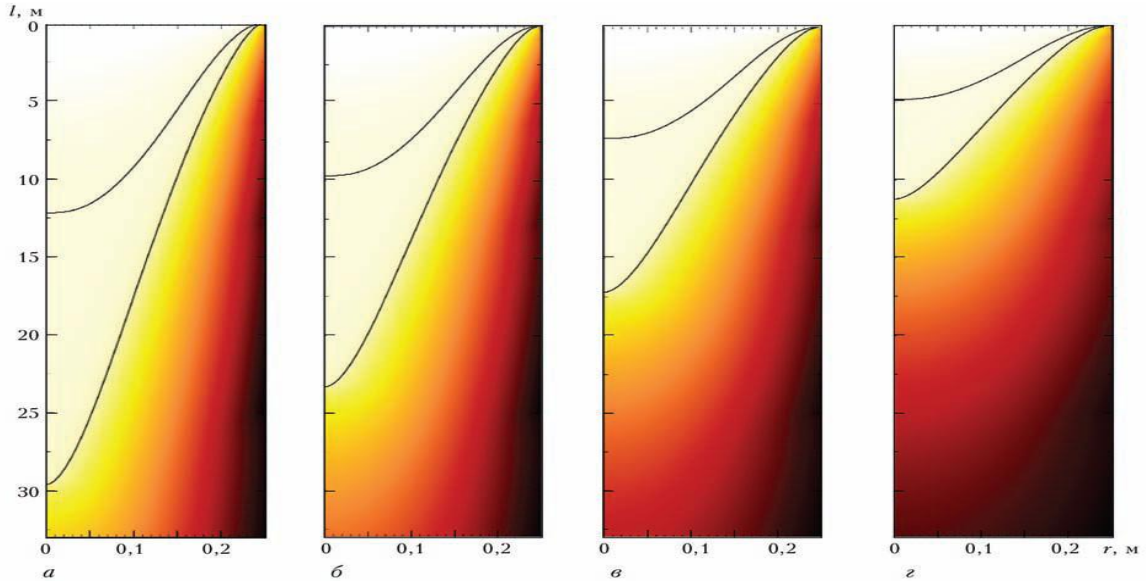
Теплопровідність зливка визначали відповідно до роботи [21] :

$$\lambda = \begin{cases} K\lambda_L & T > T_L \\ \lambda_L[1 + (\lambda_S - 1)f^2] & T_S \le T \le T_L, \\ \lambda_S & T < T_S \end{cases} \qquad (1.11)$$

де *K* - експериментальний коефіцієнт .

Результати розрахунків для зливка діаметром 500 мм та різних швидкостей розливання наведено на рис. 1. 8. Вони показали, що незважаючи на те, що при розрахунках були враховані ефекти впливу чотирьох зон вторинного охолодження , що відрізняються ефективністю тепловідведення , зберігається практично прямолінійна залежність зменшення глибини рідкометалевої та двофазної зон від зменшення швидкості розливання . Розрахунковий зменшення глибини двофазний зони з 29 до 11 м дозволяє припустити , що пропонований комбінований спосіб безперервний або напівбезперервний розливання в поєднанні з ЕШО може бути перспективним при напівбезперервній виливку ковальських злитків великого перерізу на вертикальних машинах [22].

Зазначимо також , що чітко проявився новий виток інтересу до напівбезперервний розливу , що демонструється в останні роки в Австрії , Німеччині , Китаї та деяких інших країнах [23]. У поєднанні з фактом введення в експлуатацію в США, Ю. Кореї та Китаї ряду вертикальних машин безперервного лиття злитків діаметром до 1000 мм [8–10] дослідження у цьому напрямку необхідно розширити з метою отримання не тільки якісної заготівлі для прокатки рейок високого якості, а й ковальського зливка.



а - 0,5; *б* - 0,4; *в* - 0,3; *г* - 0,2

Рисунок 1.8 – Залежність розподілу температурног поля безперервнолитих злитків діаметром 500 мм від швидкості розливання, м/хв

Ці розрахункові дані свідчать про перспективність запропонованого методу зниження осьовий неоднорідності, але вони вимагають попередньою оцінки можливостей реального промислового виробництва . Мова йдеться про те, що в промислових умовах рейкову сталь зазвичай розливають на 5-6-ручкових машинах з загальним проміжним ковшем для всіх струмків.

Можливі проблеми при розливанні серії з кількох плавок при суттєвому (у кілька раз) зниженні швидкості витяжки на одному або кількох струмках можуть виникнути при реалізації коротких серій розливок методом «плавка-наплавлення». Іншими словами, при переході від розливання рейкової сталі до розливання іншої марки, не вимагає зниження швидкості розливання сталі, коли необхідно переривати розливання на струмку , що реалізує процес МНЛЗ + ЕШП.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз методів та механізмів безперервного розливання металів та сплавів: розливання слябів, сортового прокату, трубчастого прокату, напівбезперервного лиття, розливання в горизонтальний кристалізатор.

2. Розглянуто підходи до моделювання процесів безперервного розливання. Показано умови затвердіння в кристалізаторах та зонах вторинного охолодження.

3. Наведено методи теплових розрахунків в умовах безперервного розливання. Встановлено залежність швидкості охолодження та кристалізації по зонах вторинного охолодження від швидкості розливання розплавів.

2. РОЗРАХУНКИ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ РОЗЛИВАННІ ЧАВУНУ

2.1 Аналіз методів розрахунку теплових процесів

У роботі [24] представлено аналітичне рішення задачі затвердіння розплаву в кристалізаторі горизонтального встановлення безперервного розливання. Рішення рівняння, отримане у безрозмірних величинах, що включає поля температури та рівняння для визначення межі розділу фаз, може бути отримано за допомогою математичного пакета MathCAD для конкретного набору вихідних даних.

При сучасному рівні розвитку чисельних методів та обчислювальної техніки, можна скласти математичну модель та провести її чисельне дослідження практично для будь-якого процесу. До переваг чисельного рішення можна віднести низьку вартість, швидкість дослідження, повноту отриманої інформації, можливість моделювання реальних умов. До недоліків - помилки для формування математичної моделі, у результаті при чисельному розв'язанні завдання виходить неправильне рішення.

Численні методи рішення умовно можна розбити на дві групи, виділяючи прямі та ітераційні методи.

Прямі методи дозволяють за кінцеве число дій отримати точне рішення системи рівнянь, якщо вхідна інформація задана точно і обчислення ведуться без заокруглення. Найпростіший приклад прямого методу – метод прогонки. Ітераційний метод дозволяє знайти наближене рішення системи шляхом побудови послідовності наближень (ітерацій), починаючи з деякого початкового. Саме наближене рішення є результатом обчислень, одержаних після кінцевого числа ітерацій.

До прямих можна віднести методи Гауса і квадратного кореня, до ітераційних - Гауса-Зейделя, верхньої релаксації, поперемінно-трикутний, варіаційно-ітераційні, Ньютона, зважених нев'язок, контрольних обсягів і

ряд ін. Застосування чисельних методів при розрахунку теплообміну і гідродинаміки детально розглянуто.

При дослідженні теплообмінних процесів у металургії традиційна постановка задачі про затвердіння розплаву виглядає наступним чином [53]. Є масив розплаву завтовшки *l*. Одна частина масиву ($0 \le x \le \varepsilon$) зайнята новою фазою (тверда кірка), інша частина ($\varepsilon \le x \le l$) утворена вихідною фазою (розплав).

Розв'язанням задачі теплопровідності (завдання Стефана) даної системи покладаються функції $T1(x, t)$, $T2(x, t)$ і ε, що задовольняють рівнянням:

$$\partial T1/\partial t = a1(\partial^2 T1/\partial x^2) \text{ при } 0 \le x \le \varepsilon, \quad (2.1)$$

$$\partial T2/\partial t = a2(\partial^2 T2/\partial x^2) \text{ при } \varepsilon \le x \le l, \quad (2.2)$$

$$\left(\lambda 1 \frac{dT1}{dx}\right)_{x=0} = -g_1(t); \left(\lambda 2 \frac{dT1}{dx}\right)_{x=0} = -g_2(t); \quad (2.3)$$

$$T(x,0) = \varphi(x) \text{ при } 0 \le x \le l, t = 0, \quad (2.4)$$

$$T1(x, t) = T2(x, t) = T_{кр}, \quad (2.5)$$

$$pL\frac{d\varepsilon}{dt} = \left(\lambda 1 \frac{dT1}{dx} - \lambda 2 \frac{dT1}{dx}\right)x = \varepsilon \quad (2.6)$$

У формулах (2.1) - (2.6) індекс 1 відносить змінні до твердої кірки, індекс 2 - до розплаву.

Рушійною силою процесу є відведення тепла від поверхні $x = 0$ де величина щільності потоку тепла $q1(t)$ вважається відомою. На поверхні розділу твердої та рідкої фаз зберігається рівноважна температура кристалізації, тобто. $T_{кр} = \text{const}$, причому величина переохолодження розплаву належить дуже малою.

Знаючи граничні умови при $x = 0$ і $x = l$ і початкову температуру розплаву, слід знайти температурні поля в старій і новій фазах, а також закон зміни розмірів області, зайнятої новою фазою. Постановка задачі Стефана включає умову гладкої, без місцевих виступів межі розділу фаз, де підтримується рівноважна температура кристалізації. Тим часом прямі

спостереження кристалізації металевих сплавів вказують на існування двофазної зони в твердіє злитку.

При нерівномірному розподілі температури за перерізом злитка наявність інтервалу температур кристалізації неминуче веде до утворення двофазної зони, обмеженої ізотермами початку та кінця процесу кристалізації (T н , T к). У загальному випадку в перерізі зливка в ході твердіння можна виділити три зони: зону перегрітого рідкого розплаву, двофазну зону і зону сплаву, що повністю затвердів. Наявність двофазної зони веде до того, що теплота фазового перетворення L виділяється в об'ємі двофазної зони, що переміщається в перерізі злитка під час затвердіння. Чим ширший інтервал кристалізації, тим більше розсіяно у просторі виділення теплоти фазового переходу. У зв'язку з цим при вивченні затвердіння злитків, що кристалізуються в інтервалі температур, облік виділення тепла кристалізації природно здійснити, вводячи функцію джерела тепла диференціальне рівняння теплопровідності для елемента двофазної зони:

$$p\text{См}\ \frac{d\text{T}}{dt} = div\ \left(\lambda \text{gradT}\right) + pL\frac{d\psi}{dt}\Big), \qquad (2.7)$$

де ψ = Vтв / V0 - відносна кількість твердої фази в межах двофазної зони.

$$\psi = \psi(\text{T}) \text{ при } \text{Xн} < \text{X} < \text{Xk}.$$

Інтегруючи рівняння (2.7) при відповідних крайових умовах, знаходиться розв'язання задачі у вигляді розподілу температури в злитку та координат двофазної зони ($X_{\text{н}}, X_{\text{к}}$) у різні моменти часу від початку процесу.

Залежно від того, яким чином визначається кількість твердої фази в рівнянні (2.7), задача теплопровідності для твердіння зливка може бути нерівноважною або квазірівноважною. Найбільш поширена модель квазірівноважної кристалізації сплаву, при якій теплота фазового переходу

виділяється всередині інтервалу кристалізації, обмеженого значеннями температури ліквідусу і солідуса сплаву. Відповідно рівняння теплопровідності (2.7) набуде наступного вигляду:

$$\rho c \text{ еф } (T)\, \partial T/\partial t = \text{div } (\lambda \text{ grad} T) . \qquad (2.8)$$

Стефанівська модель, квазірівноважна модель затвердіння розплаву засновані на тому, що величиною переохолодження розплаву в межах двофазної зони можна знехтувати. Це дозволяє отримати простий математичний опис умов на фронті кристалізації зливка у формі нелінійного рівняння теплопровідності з відповідними крайовими умовами. Інтегрування отриманої системи рівнянь призводить до визначення поля температур у злитку та закону переміщення фронту кристалізації.

У роботі [25] розглянуто математичну модель для чисельного моделювання процесу напівбезперервного лиття плоских алюмінієвих злитків, реалізована у програмному пакеті ProCAST. В результаті розрахункового дослідження одержано температурні поля в перерізі злитка в процесі затвердіння розплаву (рис. 2.1).

У роботі [26] проведено аналіз теплового стану металу у процесі лиття на основі програмних комплексів ANSYS та ProCAST. Наведено результати комп'ютерного моделювання лиття платини у водоохолоджувальну виливницю з рухомим дном (рис. 2.2).

Авторами конструкції даної установки розроблено з'єднувальний вузол тигля з кристалізатором, що дозволяє створити надійне з'єднання двох елементів у ході підготовки машини до початку процесу лиття та запобігти витіканню розплавленого матеріалу камеру кристалізатора. Сконструйовано витяжний пристрій, що здійснює контрольовану витяжку всього сортаменту, що розливається, за заздалегідь обраною програмою. Кристалізатор виконаний з внутрішньою робочою порожниною, що забезпечує рівномірне тепловідведення від усіх граней заготівлі, що

відливається. Також представлена конструкція охолоджуючого пристрою, що служить для вирівнювання температури заготівлі, як її товщиною, так і шириною, що дозволяє отримати рівномірну структуру виробів [1].

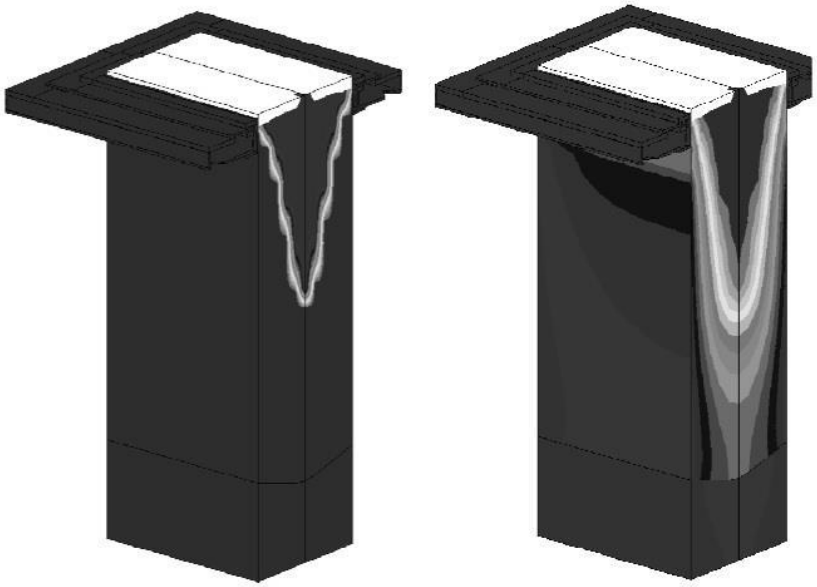
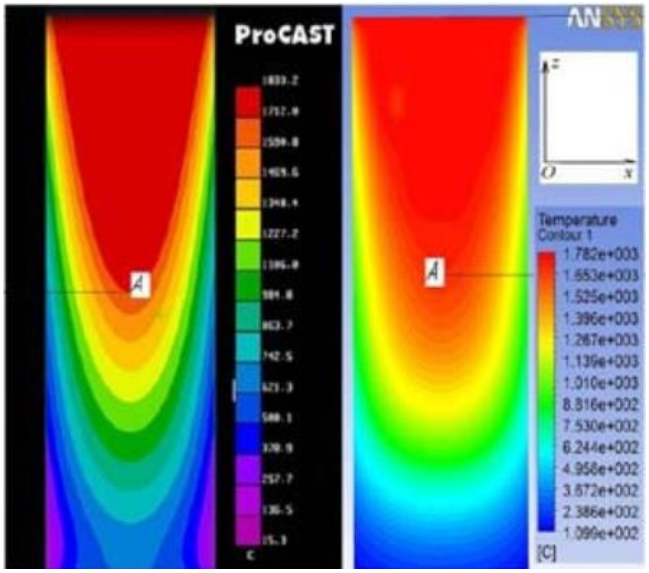


Рисунок 2.1 – Розподіл твердої фази в злитку (*а*); і температури твердне зливка в кристалізаторі (*б*) на 1590 з процесу [25]



а б

Рисунок 2.2 – Температурне поле у розрахунковому перерізі виливки (*а і б* – розрахунок у пакетах ProCAST та Ansys відповідно [26])

При оцінці авторами ступеня адекватності результатів теплових розрахунків, отриманих у моделях ANSYS та ProCAST, встановлено, що

характер та чисельні значення температурних полів в обох моделях виявилися досить близькими.

У роботі [27] розглядається математична модель та результати чисельних досліджень теплообміну при безперервному лиття. У моделі рівняння записані в циліндричній системі координат, використовувалася шахова сітка та алгоритм для розрахунку поля течії SIMPLER.

Авторами [28] запропоновано модель нерівноважної кристалізації для чисельного розв'язання задачі вирощування напівпровідникових кристалів, засновану на розв'язанні нестаціонарного завдання Стефана з урахуванням дії механізму концентраційного переохолодження розплаву, а також дискретності переміщення температурного профілю.

У роботі [29,30] розроблено математичну модель процесу кристалізації для двокомпонентних розплавів на прикладі сплаву Sn+20% Pb. Чисельно вирішується завдання Стефана з двома межами: тверда фаза – двофазна перехідна зона та двофазна зона – рідка фаза.

2.2 Дослідження теплообміну під час розливання на установці з горизонтальним кристалізатором

Поєднання процесів безперервного лиття та пресування (НЛіП) металу в єдиний технологічний ланцюжок можливе тільки за таких теплових умов у системі метал-інструмент-довкілля, які забезпечують затвердіння розплаву в канавці колеса-кристалізатора і пресування затверділого зливка силами контактного тертя при заданій

Температурно-швидкісний режим роботи установки має вирішальне значення для створення оптимальних умов процесу лиття-пресування. З одного боку, висока температура пресування може призвести до зниження якості прес-виробів до появи шлюбу. З іншого – дуже низька температура веде до підвищення опору деформації. Тому при виборі температурно-

швидкісного режиму необхідно уникати обох зазначених граничних випадків [31].

Одним з основних параметрів цього процесу є проміжок часу між заливкою інструмент розплаву і входом затверділого металу під пресовий інструмент (дугоподібний сегмент) з матрицею. А також визначення проміжку часу, після якого необхідно примусово охолоджувати дугоподібний сегмент [32]. У свою чергу, величина цього проміжку часу залежить від таких факторів, як температура розплаву, віддаленість матриці від місця заливання, швидкість руху канавки з металом, інтенсивність його охолодження, розміри поперечного перерізу і т. д. Крім цього, режими кристалізації та охолодження зливка істотно впливають на формування його структури та властивостей . Складний характер взаємодії між цими факторами досі вивчений недостатньо, що ускладнює проектування пристроїв сумісного процесу лиття та пресування.

2.3 Конструкція та принцип роботи установки

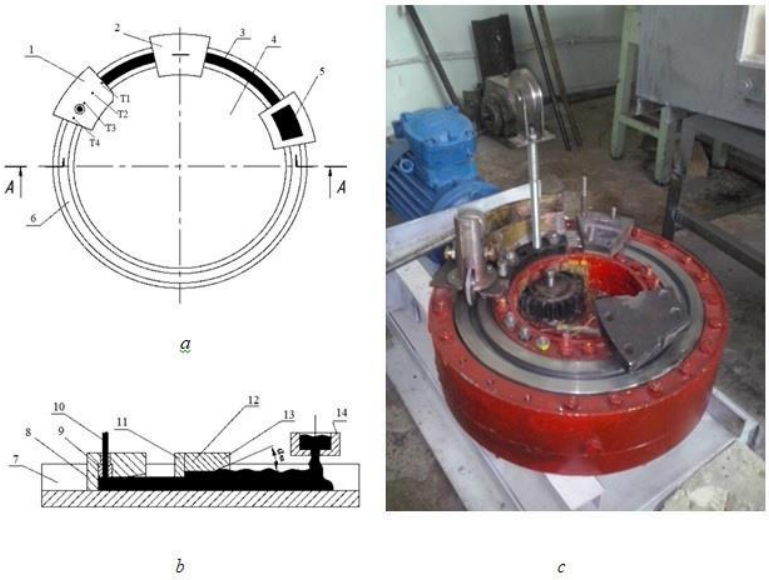
Спосіб пресування Conform-Castex, при якому рідкий метал заливається в установку, є економічним способом отримання стандартного дроту або профілів з інших способів виготовлення аналогічних виробів з твердого металу шляхом деформації [33]. Проте технічних даних щодо Такій установці та практичних результатів експлуатації в технічній літературі не наводиться. Така установка повинна відповідати таким вимогам:

– розплавлений метал не твердне у початковій фазі процесу;

– швидкість переміщення розплавленого металу постійна і відповідає швидкості його затвердіння, що визначається інтенсивністю тепловідведення від вузла пресового інструменту;

– у потоці розплавленого металу має бути виключено турбулентність.

Використання базової установки Conform для безперервної заливки в канавку робочого колеса рідкого металу, його затвердіння та пресування викликає утруднення у дотриманні цих вимог, зокрема, у стабілізації подачі металу в інструмент, внаслідок «наморожування» рідкої фази розплаву при затвердінні на вхідній частині нерухомої кільцевої. Усунення цього недоліку можливе при поєднанні безперервного пресування з безперервним литтям металу на установці Conform з вертикальною віссю обертання колеса-кристалізатора карусельного типу [34]. На рис. 2.3 наведена схема установки суміщеного НЛіП з карусельним горизонтальним кристалізатором (ГК).



а – вид зверху: 1 – основний нерухомий дугоподібний сегмент; 2 – проміжна нерухома сегментна вставка; 3 – зона кристалізації металу; 4 – кристалізатор; 5 – дозатор; 6-кільцева канавка; Т1, Т2, Т3, Т4 – датчики температури у тілі дугоподібного сегмента; b – вид збоку: 7 – кільцева канавка; 8 – виступ; 9 – матриця; 10 – прес-виріб; 11 – виступ; 12, 13 – ділянки проміжної нерухомої сегментної вставки; 14 – дозатор; с – загальний вигляд установки

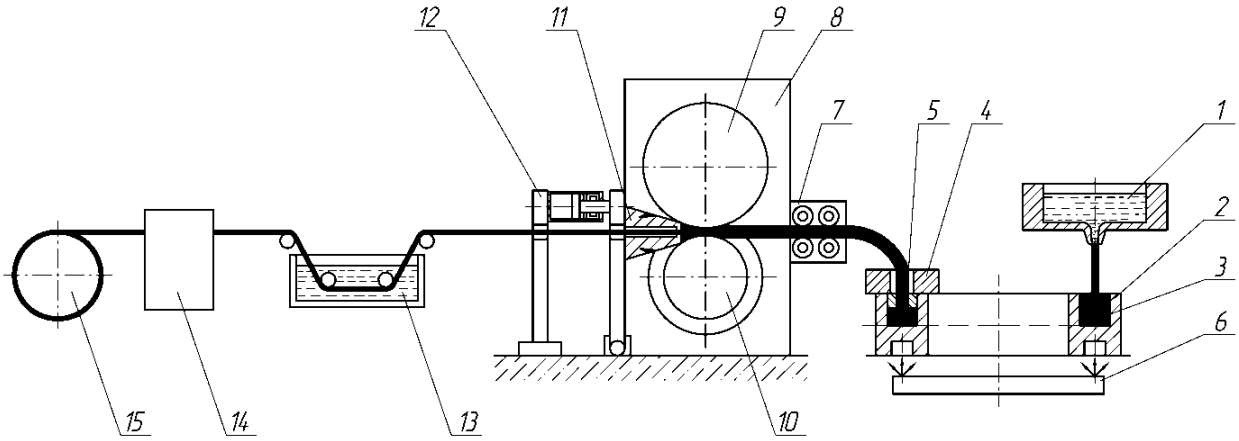
Рисунок 2.3 – Схема установки сумісного безперервного лиття та пресування з горизонтальним кристалізатором [35]

У процесі роботи установки приводиться в обертання кристалізатор *2* виконаний у вигляді горизонтального колеса. Реалізація процесу відбувається в наступній послідовності: розплавлений метал через дозатор

1 заливається в кільцеву канавку *3* виконану на верхній частині колеса кристалізатора *2* . При цьому швидкість заливання розплавленого металу в кільцеву канавку *3* знаходиться у суворій відповідності до частоти обертання кристалізатора *2* . За час руху до проміжної нерухомої сегментної вставки *8* розплавлений метал охолоджується, твердне і набуває форми поперечного перерізу канавки *3* . У проміжній нерухомій сегментній вставці *8* на поверхні затверділого металу опрацьовується зовнішній шар з ливарними дефектами і збільшується інтенсивність контакту металу зі стінками кільцевої канавки *3* . Далі затверділий метал у кільцевій канавці *3* по ходу обертання кристалізатора *2* досягає виступу 6 під нерухомим дугоподібним сегментом *4* де під дією сил контактного тертя між стінками кільцевої канавки *3* і затверділим металом відбувається видавлювання через робочий канал матриці *5*.

Датчики температури розташовані в тілі дугоподібного сегмента на поглибленні 1,5 см в центрі осі симетрії. Датчик температури *T1* відповідає початку дугоподібного сегмента, *T2* – повороту на 20° навколо осі симетрії установки від початку дугоподібного сегмента, *T3* (поруч із матрицею) – 40°, *T4* – 65° відповідно (див. рис. 2.1а.). Поперечний переріз струмка колеса-кристалізатора прямокутний з радіусом 1÷2 мм у місцях сполучення дна зі стінками. Виступ дугоподібного сегмента з матрицею сполучається з струмком, входячи в нього на глибину 4 мм, утворюючи тим самим калібр перерізом 10х10 мм. Дугоподібний сегмент та кристалізатор виготовлені зі сталі 5ХНМ, заливна вирва – з шамоту. Розмір отвору для подачі розплаву в канавку кристалізатора розрахований згідно із законом сталості секундних об'ємів і становить 1,8 мм.

Для підвищення продуктивності процесу НЛіП та якості прес-виробів із кольорових металів та сплавів запропонована установка для безперервного лиття, прокатки та пресування металу [36], представлена на рис. 2.4.



1 - піч-міксер з живильником; 2 – колесо-кристалізатор; 3 – кільцева канавка; 4 – нерухома секторна вставка; 5 – вертикальна матриця; 6 - пристрій для охолодження кристалізатора; 7 - правильно-задає пристрій; 8 – деформуючий вузол; 9 – валок із виступом; 10 – валок із струмком; 11 – горизонтальна матриця; 12 - гідроциліндр; 13 - охолодний пристрій прес-виробу; 14 – універсальна прокатна кліть; 15 – пристрій для намотування виробів .

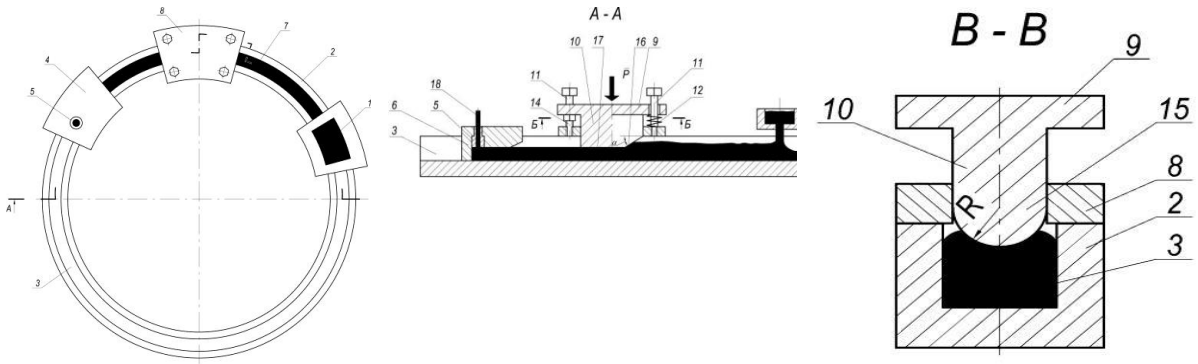
Рисунок 2. 4 – Схема установки для безперервного лиття, прокатки та пресування металу [36]

Під час роботи установки приводиться в обертання кристалізатор 2, виконаний у вигляді диска, і вмикається пристрій 6 для його охолодження. Розплавлений метал з печі-міксера з живильником 1 заливається в кільцеву канавку 3, виконану на верхній частині диска кристалізатора 2. За час руху до нерухомої секторної вставки 4 розплавлений метал охолоджується, твердне і приймає форму поперечного перерізу канавки 3. Перед входом в робочий калі видаляється зовнішній шар із ливарними дефектами. Затверділий метал кільцевої канавці 3 по ходу обертання диска досягає упору в робочому калібрі. Далі під впливом сил контактного тертя між стінками кільцевої канавки 3 і затверділим металом відбувається його видавлювання через робочий канал вертикальної матриці 5. деформації і видавлюється у вигляді прес-виробу через горизонтальну матрицю 11,

потиснуту гідроциліндром 12. Потім прес-виріб змотується в бухту на пристрої намотування 15, пройшовши перед цим охолодження в ємності охолоджувального пристрою 13 і калібрувальну прокатку 4 заготівля, отримана в горизонтальному карусельному кристалізаторі, має більш опрацьовану дрібнозернисту структуру та підвищену пластичність, ніж лита заготівля, отримана в електромагнітному кристалізаторі. На поверхні заготовки, виготовленої за допомогою запропонованої установки, відсутні ливарні дефекти, розміри перерізу стабільні за її довжиною, а квадратний переріз створює більш сприятливі умови при її деформуванні в вузлі, що деформує, і підвищує точність розмірів прутка після пресування. На цю установку отримано патент РФ №102550 [36].

Для підвищення стабільності процесу безперервного лиття - пресування та якості прес-виробів з кольорових металів і сплавів запропонована установка для безперервного лиття та пресування металу з горизонтальним кристалізатором [35], представлена на (рис. 2. 5 , а – в).

Під час роботи установки приводиться у обертання кристалізатор 2, виконаний у вигляді диска. Розплавлений метал з живильника (на кресленні не показаний) надходить у піч-міксер з дозатором 1 і далі заливається в кільцеву канавку 3, виконану на верхній частині диска кристалізатора 2. При цьому швидкість заливки розплавленого металу в кільцеву канавку 3 для оптимального її заповнення знаходиться в . до проміжної нерухомої сегментної вставки 8 розплавлений метал охолоджується, твердне і приймає форму поперечного перерізу канавки 3. Під час проходження оброблюваним металом через проміжну нерухому сегментну вставку 8 за допомогою притискного пристрою під дією сили (не показано на кресленні) відбувається вдавлювання деформованого металу зі стінками кільцевої канавки 3. Далі оброблюваний метал в кільцевій канавці 3 по ходу обертання кристалізатора 2 досягає основного черевика 4, де під дією активних сил контактного тертя між стінками кільцевої канавки 3 і оброблюваним металом відбувається його видавлювання 5.



а б в

1 – піч-міксер із дозатором; 2 – колесо-кристалізатор; 3 – кільцева канавка; 4 – черевик; 5 – матриця; 6 – виступ; 7 – зона кристалізації металу; 8 – проміжна нерухома сегментна вставка; 9 – плита; 10 – пуансон; 11 - напрямні колонки; 12 – пружини; 13 - напрямний отвір; 14 - регулювальні гвинти; 15 - опукла робоча поверхня пуансона; 16 - похила ділянка робочої поверхні пуансона з вхідним кутом; 17 – паралельний дну кільцевої канавки ділянку робочої поверхні пуансону експлуатації) в результаті тепловиділення в процесі затвердіння та пресування.

Рисунок 2.5 – Схема установки для безперервного лиття та пресування металу з горизонтальним кристалізатором [35]

Встановлено, що з метою вдосконалення конструкції та теплових процесів у встановленні безперервного суміщеного лиття та пресування алюмінієвих сплавів з горизонтальним кристалізатором потрібні подальші експериментальні та розрахунково-теоретичні дослідження нестаціонарного теплообміну.

У роботі [37] розглядається комп'ютерна модель кристалізації алюмінієвого розплаву при моделюванні процесу беззлиткової прокатки, з урахуванням дифузії елементів, що легують.

У роботах [38,39] описано чисельні моделі завдання Стефана з використанням точного розв'язання. Наведено результати дослідження

впливу настроювальних параметрів чисельного алгоритму на похибку моделювання.

Також розробці математичних моделей та чисельному дослідженню процесу лиття та затвердіння розплаву присвячені роботи зарубіжних вчених [40] та багато інших.

У роботі [41] розроблено підхід до математичного моделювання процесу пресування попередньо нагрітих алюмінієвих циліндричних заготовок. Реалізація чисельної моделі процесу пресування у цій роботі проводиться з урахуванням програмного пакета Ansys LS-Dyna, що дозволяє шукати рішення спільно механічної і теплової завдання.

У роботі [31] описано методику створення комп'ютерної моделі процесу напівбезперервного пресування довгомірних профілів з алюмінієвих сплавів. Наведено результати комп'ютерного моделювання процесу напівбезперервного пресування сплаву АД31 у програмному комплексі Deform-3D.

У роботі [41] автори розглядають напружено-деформований стан біметалу при пресуванні через ступінчасту матрицю складної форми. Для комп'ютерного моделювання авторами було обрано пакет ABAQUS/CAE. Описана в [42] модель враховує деформаційне та швидкісне зміцнення та термічне розміцнення, а також має можливість задавати модель пластичного руйнування з обчисленням параметра пошкодженості.

У роботі [43] авторами представлена математична модель та проведено розрахункове дослідження закономірностей формування температурного режиму при радіальному СВС-пресуванні циліндричних заготовок з неоднорідним утеплювачем. Відзначено, що для реального технологічного циклу тепловий режим при радіальному СВС-пресуванні можна вважати квазістаціонарним із квазіоднорідним температурним полем у заготівлі та піщаній оболонці.

У роботі [44] розроблено математичну модель для технологічних завдань пресування кольорових металів з використанням відносних

параметрів та комплексних критеріїв. Багатопараметрична модель дозволяє визначити силові, швидкісні, температурні параметри процесу та їх зміну у часі.

Розробці математичних моделей та чисельному дослідженню процесу пресування присвячено безліч робіт вітчизняних вчених [46] та зарубіжних колег [45] та ряд ін.

Авторами робіт [47] наведені математичні моделі та результати чисельних досліджень суміщеного процесу безперервного лиття та деформації для різних установок.

Чисельні дослідження процесу безперервного лиття та пресування кольорових металів в інноваційній установці з ГК розглядаються в роботах [48]. Величина цієї зміни залежить від кількості роботи, що витрачається на подолання контактного тертя, здійснення деформації металу, яка практично вся перетворюється на тепло [43]. При збільшенні коефіцієнта витяжки підвищується площа контакту заготовки з нерухомим інструментом та робота на здійснення деформації, що спричиняє зростання температури пресування [44].

Для моделювання процесу кристалізації у горизонтальному кристалізаторі авторами застосовано програмний комплекс ProCast, у свою чергу модель процесу пресування за методом Конформ реалізована у пакеті інженерного аналізу Deform-3D. Відповідно чисельне дослідження проводилося у два етапи. На першому етапі моделювали процес лиття в карусельний кристалізатор. Отримували розподіл температури у затверділому металі перед попаданням під дугоподібний сегмент. Отримані результати моделювання використовувалися як вихідні дані другого етапу чисельного дослідження – моделювання процесу пресування методом Конформ [49].

У роботах [50] розглянуто аналіз теплової взаємодії при пресуванні, який зводиться до оцінки на основі рівняння теплового балансу системи метал – інструмент – довкілля в осередку деформації. Використання даної

методики розрахунку для вибору температурно-швидкісних режимів безперервного пресування металів з урахуванням опору деформації від температури, ступеня та швидкості дозволить у першому наближенні встановити раціональний режим та вибрати шляхи щодо його вдосконалення.

Аналітичне рішення задачі нестаціонарної теплопровідності процесу пресування розглянуто в роботі [49] де визначено залежності кількості виділеного тепла від тертя та в процесі деформації оброблюваного металу під дугоподібним сегментом установки безперервного лиття та пресування.

Для встановлення завдання теплопровідності розглядаються умови теплообміну при пресуванні способом Конформ. Заготівля, нагріта до відомої температури, переміщається під дією активних сил тертя щодо дугоподібного сегмента, з постійною швидкістю з подальшим видавлюванням профіль через робочий отвір в матриці. Із зовнішньої поверхні інструмент охолоджується тепловим потоком інтенсивністю.

Заготівля розбивається на дві характерні зони, що відрізняються різною термодинамікою: це осередок деформації та зона активного тертя. При цьому на межах контакту заготівлі та притискної частини черевика, зовнішньої поверхні вогнища деформації та канавки карусельного кристалізатора постійно діє джерело тепла від зовнішніх сил тертя щільністю [51].

Отримані рішення дозволяють, скорочуючи кількість змінних, чіткіше виявити внутрішні зв'язки, що характеризують процес теплової взаємодії між металом, що деформується, і примусово. охолоджуваним контейнером під час пресування. Введені в них змінні по суті є узагальненими, що забезпечує раціональне розв'язання задач для безлічі різних комбінацій параметрів, що входять до даних змінних.

На підставі вище викладеного приходимо до висновку, що в аналітичному вигляді можна отримати рішення лише невеликої частини завдань, що мають практичний інтерес. Ці рішення часто містять

нескінченні ряди, спеціальні функції та їх числова оцінка може бути складним завданням.

На сьогоднішній день, для вирішення різноманітних завдань, існує безліч програм, що реалізують чисельне рішення задачі на основі математичного моделювання, які називаються системами автоматизації інженерних розрахунків або CAE системами. Їх можна розділити на дві групи: вузькоспрямовані та універсальні CAE системи. Вузконаправлені CAE системи, зазвичай, розробляються для конкретних пристроїв.

Діяльність [42] зазначено, що з аналізу напружено-деформованого стану чисельні методи знаходять широке застосування у програмних системах: Ansys, Abaqus, QForm-3D, Super Forge, Deform-3D та інших.

Моделювання процесів обробки металів тиском дозволяє проводити всебічні дослідження, оскільки дозволяє змінювати базові параметри моделі у широкому діапазоні. Автори [52] відзначають, що програмний комплекс Ansys є універсальним засобом для проведення чисельних досліджень методом кінцевих елементів, що дозволяє врахувати в одній моделі багато фізичних та технологічних процесів. До того ж на сьогоднішній день багато програм інтегровано в програмний пакет ANSYS Workbanch.

3. ПРОЦЕСИ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ ЧАВУНУ: ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ

3.1 Оцінка процесів формування мікроструктури чавуну

Дослідження процесів кристалізації заготовок при безперервному литті чавуну дозволило встановити значення теплових умов на формування та якість виливків. Характеристики чавуну визначаються структурою, що формується в процесах кристалізації і подальшим охолодженням у твердому стані, які впливають на швидкість виділення графіту в рідкому і твердому стані. Геометрична форма та розподіл графіту, структура металевої основи чавуну залежать від хімічного складу, кількості легуючих елементів і модифікаторів сприятливих процесу графітизації , наявності елементів, що утворюють зміцнюючі сполуки та евтектики.

Специфічні умови формування виливків, особливо при безперервному литті чавуну, чутливого до умов охолодження, що істотно впливають на процес структуроутворення, фізико-механічні та експлуатаційні властивості заготовок. Газовий зазор між виливком та кристалізатором, розміри якого залежать від технологічних параметрів лиття та конструктивних особливостей кристалізатора, збільшує термічний опір при передачі тепла від виливки в середовище, що охолоджується.

Поверхневий шар чавунних заготовок при безперервному лиття створюється у водоохолоджуваному кристалізаторі при інтенсивному теплообміні в умовах високої швидкості затвердіння, що перевищує 2 мм/с.

Порушення процесу охолодження на виході виливки з кристалізатора обумовлює розігрів поверхневої кірки за рахунок виходу тепла з рідкої частини виливки. Висока швидкість кристалізації та охолодження виливки сприяє збільшення кількості недосконалостей первинної кристалічної структури чавуну та зумовлює протікання процесу само відпалу, температурні напруги, напруги, що виникають від дії металостатичного

напору та сили при вилученні виливка, прискорюють дифузійні процеси розпаду. У доевтектичних чавунах при первинній кристалізації поверхневих шарів відбувається з освітою колоній на основі аустеніто – цементито - графітових утворень. У процесі самовідпалу відбувається розпад цементиту з утворенням міждендритного графіту, протяжність такої зони може досягати 10-15 мм. Така форма графіту вважається бракувальним ознакою та зумовлює необхідність рішення завдання з зменшення розмірів такої зони.

Специфічні температурні умови кристалізації та послідуючого охолодження виливки сприяють формуванню структурних зон за товщиною заготівлі У напрямку від зовнішньої поверхні кристалізація йде з утворенням аустеніту та графітної евтектики, при цьому графіт перетворює свою форму з міждендритної до пластинчастої. Зниження швидкості кристалізації наступних шарів зумовлює освіта перліта - феритної структури металевої фази з пластинчастою формою графіту

Після закінчення процесу охолодження зона з міждендритним графітом має феритну металеву матрицю. У зоні вторинного охолодження можна регулювати інтенсивність охолодження виливки в досить широких межах. Охолодження поверхневих шарів чавунною заготівлі зі скорость 5-8°С/с, в інтервалі температур 950 - 650 °С створює умови для придушення утворення фериту та стабілізації перліту в структурі виливки.

Використання екранування дозволяє зменшувати інтенсивність охолодження виливки на виході з кристалізатора та розширює можливості регулювання процесу структуроутворення виливки.

Використання екранування, природного або примусового охолодження в різних температурних інтервалах забезпечує можливість отримання чавуну з різною структурою та властивостями. Зниження швидкості охолодження та/або витримка в інтервалі темпера тур вище евтектоїдного метастабільного перетворення забезпечує утворення ферито - графітової евтектоїдної суміші замість ферито-цементитної .

Для отримання заготовок методом безперервного лиття використовується доевтектичний чавун. мінімальним змістом карбідоутворюючих елементів. Вміст вуглецю в межах 3,4-3,7% З забезпечує мінімізацію можливості утворення цементиту в поверхневих шарах заготівель.

Підвищення кількості кремнію призводить до зменшення розчинності вуглецю в розплаві, цей факт сприятливо позначається на розвитку процесу графітоутворення при формуванні чавуну структури. Підбором концентрації кремнію можна регулювати співвідношення в матриці чавуну кількість фериту і перліту. Доведено, що для отримання виливків без відбілу вміст кремнію має бути в межах 1,9–2,6%.

Марганець збільшує розчинність вуглецю в чавуні. При вмісті марганцю вище 0,5% відбувається гальмування процесу графітизації , збільшується схильність до утворення цементиту. На етапі евтектичної кристалізації марганець відноситься до слабких графітизаторів , а при евтектоїдному перетворенні стабілізується перліт. При невеликих змістах, марганець сприятливо впливає на дисперсність перліту та збільшує твердість перліту. Частина марганцю витрачається на утворення сполук із сіркою. Для нейтралізації шкідливого впливу сірки співвідношення вмісту марганцю із сіркою потрібно підтримувати в межах 4-5. Оптимальне зміст марганцю в чавуні не більше 0,6% [55].

Особливу роль грає фосфор, який знижує температуру евтектичного перетворення та сприяє графітизації . Фосфор практично не розчинний у цементиті, слабо розчинний в аустеніті та фериті. При кристалізації чавуну фосфор концентрується в маточному розплаві, залишкові порції якого тверднуть в вигляді потрійний фосфідний евтектики (6,89%) Р; 1,96% З ; 91,15% Fe). Легкоплавка фосфідна евтектика концентрується за межами евтектичних зерен. В результаті цього міцність затверділої скоринки на виході з кристалізатора, при температурах близьких до температурі кристалізації, значно знижується та призводить до порушень стабільності

процесу лиття. Фосфор не впливає на процес графітизації , сприяє освіті фосфідної евтектики та підвищує схильність до утворення холодних тріщин. на склад фосфідний евтектики значне вплив надає швидкість охолодження. За високої інтенсивності охолодження утворюється потрійна фосфідна евтектика, призменшенні швидкості охолодження - подвійна. Фосфор має слабке впливом геть збільшення кількості перліту у структурі чавуну. В областях, що перебувають у контакті з включеннями фосфідної евтектики, аустеніт збагачений вуглецем, тому при охолодженні в евтектоїдному інтервалі температур розпад аустеніту йде з утворенням перліту. Фосфідна евтектика відрізняється підвищеною твердістю НВ450-500 і крихкістю. Зменшення кількості фосфору зумовлює погіршення якості поверхні заготівель. При змісті фосфору менше 0,1% спостерігається збільшення кількості настилів на поверхні виливки.

Сірка негативно впливає на властивості чавуну, сприяючи формуванню за межами зерен евтектики (□□+ Ц+FeS) та підвищує схильність чавуну до тріщиноутворення. Вільна сірка ускладнює процес графітизації та прискорює відбілюючу дію на структуру чавуну, це особливо характерно для чавунів із низьким вмістом кремнію. Сульфіди FeS , MnS виділяються по кордонам дендритів та/або евтектичних колоній, виступаючи у вигляді самостійної фази. Ці фази у чавуні надають негативний вплив на пластичність та міцність чавуну. У зв'язку з цим вміст сірки в чавунах має бути по можливості мінімальним.

Розчинні поверхнево-активні домішки, які адсорбуються на поверхні графіту, можуть перешкоджати процесу графітизації .

Висока міцність чавуну обумовлюється структурою чавуну з дрібними, розгалуженими дендритами аустеніту та подрібненими евтектичними зернами. Висока швидкість охолодження подрібнює аустенітні дендрити та збільшує їх кількість. Збільшення розмірів дендритів первинного аустеніту викликає поява междендритного графіту

Технологічні параметри процесу безперервного лиття дозволяють

впливати на швидкість кристалізації і, отже, формування структури виливки. З'являється можливість на процес затвердіння шляхом вибору конструкції окремих вузлів та елементів установки, таких як кристалізатор, заливальне пристрій і і т.д.

3.2 Регресійний аналіз процесів формування та оптимізації структури чавуну

Однією з найбільш важливих завдань отримання литих заготовок, що відповідають відповідним технічним вимогам, є встановлення взаємозв'язку хімічного складу чавуну та технологічних параметрів процесу з механічними і експлуатаційними властивостями литих заготівель.

Для скорочення обсягу експериментальних робіт та оцінки залежностей, що пов'язують основні технологічні параметри, використовується математичне планування експериментів.

Проведені у роботі [56] дослідження дозволили визначити область технологічних параметрів та хімічний склад чавуну для різних типорозмірів заготовок, що забезпечують отримання виливків без вибілювання . Якщо структура та властивості внутрішньої поверхні виливки, що оформляється піщаним стрижнем, в більшості випадків задовольняє вимогам до зносостійких деталей, то отримання необхідного якості на зовнішній поверхні становить значну складність. Швидкість лиття і температура заливки чавуну істотно впливають не тільки на величину відбілу , але і на протяжність зони з міждендритним графітом, рівномірність властивостей по перерізу виливки, кількість перліту на робочій поверхні на глибині 2,5 мм (з урахуванням припусків на механічну обробку). Так, наприклад, збільшення швидкості лиття з 0,5 до 0,8 м/хв (для виливків з товщиною стінки) 25 мм) наводить до зменшення зони з міждендритним графітом на 30-40%. На процес структуроутворення, хоч і в меншій ступеня, ніж швидкість лиття, впливає температура металу, що заливається. У дослідженому діапазоні

хімічного складу чавуну і технологічних параметрів процесу глибина зони з міждендритним графітом знаходиться в межах від 3,2 до 13 мм.

Міждендритний графіт, сприяючи розпаду евтектичного та евтектоїдного цементиту, що призводить до утворення великої кількості фериту в поверхневому шарі виливки, що негативно позначається на експлуатаційних властивостях литих заготовок. Аналогічний вплив технологічні параметри надають і рівномірність властивостей по перерізу виливки. Для отримання високоякісних заготовок процес необхідно проводити з максимально допустимою швидкістю лиття при мінімально можливій температурі металу, що заливається. У цьому зв'язку набувають особливої важливість даних досліджень щодо визначення оптимальних технологічних параметрів процесу [57].

На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень при відпрацюванні технології вертикального безперервного лиття циліндричних заготовок із чавуну СЧ 20 можна рекомендувати технологічні параметри лиття, представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Технологічні параметри процесу

Діаметр заготівлі, мм	Припуск на механічну обробку, мм	Температура заливання металу, ^{0}C	Середня швидкість лиття , м/хв
40-80	2-3	1300-1320	0,50-0,80
80-100	2-3	1300-1320	0,40-0,70
100-150	3-4	1280-1300	0,30-0,50
150-180	3-5	1260-1300	0,25-0,40
200-250	4-5	1260-1280	0,15-0,30
170/85	3-5/4-6	1300-1320	0,40-0,50
200/115	4-5/5-6	1280-1300	

Використовуючи ці дані, було проведено повнофакторний експеримент по визначенню оптимального хімічного складу чавуну.

Оптимізацію хімічного складу чавуну проводили методом градієнт. У якості варіюються параметрів прийняті наступне межі за хімічним складом

чавуну (в % за масою): З 3,0- 3,5; Si 1,7-2,4; Mn 0,5-0,9 та Р 0,1-0,35. Залежними змінними були вибрані твердість на зовнішній поверхні (Y_1), рівномірність твердості перерізу заготовки (Y_2) і відсоток перліту на робочої поверхні (Y_3). Температура заливання металу 1250°С. Швидкість лиття 0,5 м/хв, для заготовок діаметром 100 мм та товщиною стінки 30 мм.

Отримано наступні рівняння регресії:

$$y_1 = 93{,}02 - 3{,}156x_1 - 3{,}906x_2 + 3{,}531x_3 - 0{,}2188x_4 + 0{,}2188x_1x_2 + \\ + 0{,}1563x_1x_3 + 0{,}406x_1x_4 - 0{,}5938x_1x_2 + 0{,}1563x_2x_4 - 1{,}1560x_3x_4 - \\ - 0{,}9688x_1x_2x_3 - 0{,}9375x_1x_2x_4 - 0{,}2813x_1x_3x_4 - 0{,}8438x_2x_3x_4 + \\ + 0{,}4688x_1x_2x_3x_4; \quad (3.1)$$

$$y_2 = 7{,}887 + 3{,}503x_1 + 3{,}503x_2 + 0{,}497x_3 - 1{,}685x_4 + 2{,}628x_1x_2 + 0{,}628x_1x_3 + \\ 0{,}190x_1x_4 - 1{,}128x_2x_3 + 0{,}690x_2x_3 - 1{,}19x_2x_4 - 1{,}003x_1x_2x_3 + 0{,}565x_1x_2x_4 - \\ 0{,}815x_1x_3x_4 + 0{,}184x_2x_3x_4 + 0{,}559x_1x_2x_3x_4 \quad (3.2)$$

$$y_3 = 29{,}75 - 12{,}85x_1 - 25{,}92x_2 + 9{,}41x_3 - 4{,}338x_4 + 11{,}53x_1x_2 + 2{,}718x_1x_3 - \\ 2{,}782x_1x_4 + 7{,}718x_2x_3 + 5{,}782x_2x_4 - 2{,}032x_3x_4 - 3{,}912x_1x_2x_3 + 1{,}338x_1x_2x_4 - \\ - 6{,}349x_1x_3x_4 + 2{,}599x_2x_3x_4 + 5{,}782x_1x_2x_3x_4 \quad (3.3)$$

де x_1, x_2 , x_3 , x_4 - кількість С, Si , Mn , Р в кодованому масштабі.

Встановивши параметри обмеження по рівнем поверхневий твердості $Y_1 < 100$, перепад твердості по перерізу виливки $Y_2 < 10$ максимізуючи функцію відсотка перліту на робочій поверхні заготовки, визначили оптимальний хімічний склад чавуну: 3,39; Si 2,32; Mn 0,69; Р 0,12.

Задані параметри обмеження дозволяють отримати на глибині припуску на механічну обробку тільки 49% перліту, зменшенням вмісту С і Si зростає поверхнева твердість, перепад твердості по перерізу зменшується. Досягнення вищих значень відсотка перліту можливе лише за вищих значеннях поверхневої твердості. Для заготівель більшого діаметра

рекомендується зниження вмісту С і Si на 0,1 - 0,2%, кількість марганцю бажано підтримувати на рівні 06-08%.

Структура чавуну оптимального хімічного складу характеризується в такий спосіб. По зовнішній поверхні на глибині 0,25-0,30 мм утворюється графіт у вигляді пластівців + точковий графіт феритної основі. Твердість на поверхні 229 НВ. на глибині до 3 мм дрібнопластинчастий міждендритний графіт у поєднанні з точковим Гр8. Зона з відривом 3-4 мм від поверхні характеризується междендритным графітом разом із среднепластинчатым Гф6 гніздоподібним. Металева основа П+Ф (Ф50%). Решта перетину характеризується пластинчастим графітом у поєднанні з гніздоподібним. Гф6 до Гф4. Металева основа П+Ф (Ф 5%). Твердість по перерізу змінюється від 197 до 228 НВ.

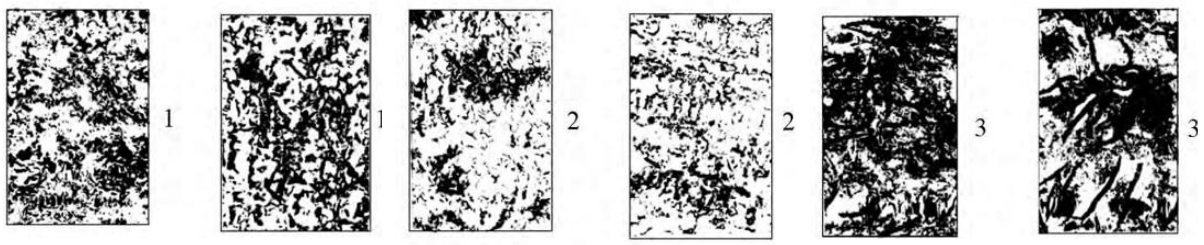
Відомо, що структура з міждендритним графітом характеризується найнижчою зносостійкістю, головним чином тому, що сприяє великій кількості фериту в металевій основі чавуну. Як показали проведені експериментальні дослідження, глибина зони з міждендритним графітом, в діапазоні максимально допустимих швидкостей лиття, приблизно відповідає товщині кірки на виході із кристалізатора. На процес структуроутворення чавуну можна впливати не тільки шляхом зміни технологічних параметрів процесу. Одним із найбільш ефективних шляхів збільшення зносостійкості є легування чавуну рівні ГОСТ1585 – 85. Даний хімічний склад чавуну дозволяє отримати на робочої поверхні 75-80% перліту.

Другий шлях отримання перлітної структури у поверхневому шар з міждендритним графітом - інтенсивне вторинне охолодження в інтервалі температур 750-550 ° С [58]. Охолоджуючи у цьому діапазоні температур виливок зі швидкістю 9,0-9,5°С/ с ми отримали в поверховій зоні з междендритним графітом повністю перлітну структуру з твердістю 229-255НВ.

3.3 Оцінка впливу структурно-фазових компонентів на функціональні властивості чавунних виливків

Серед легуючих елементів для покращення структури чавуну найбільшого поширення набули Cr , Ni , C, Ti , причому найбільш якісні результати виходять при комплексному легіро - вання цими елементами в різних поєднаннях. Специфічні теплові умови формування викликають необхідність дослідження впливу легуючих елементів на структуру та властивості чавуну.

Аналіз мікроструктур показує, що збільшення кількості введений нікель від 0,1 до 0,5% призводить до підвищення твердості в поверхневому шарі. При введенні 0,1% нікелю у зразку на глибині 1 мм має місце міждендритний графіт (Гф 4 Гр8) з розмірами 20-25 мкм, структура матриці П50. При введенні 0,5% нікелю зона з міждендритним графітом знаходиться на глибині 5,5 мм, довжина її становить 1-1,5 мм. Поступово кількість фериту зменшується, графіт укрупнюється. У наступній зоні графіт пластинчастої форми з гніздоподібним розподілом (Гф4 Гр2), розміром 30-60 мкм, у кількості 10-12% (Г12). Металева матриця містить до 90-93% (П90). На глибині 10 мм у зразку з 0,1% введеного нікелю утворюється структура звичайного чавуну з пластинчастим графітом (Гф2) нерівномірного розподілу (Гр3), частка фериту не перевищує 5%. У зразку з 0,5% вве - денного нікелю така зона має місце на глибині 15 мм.

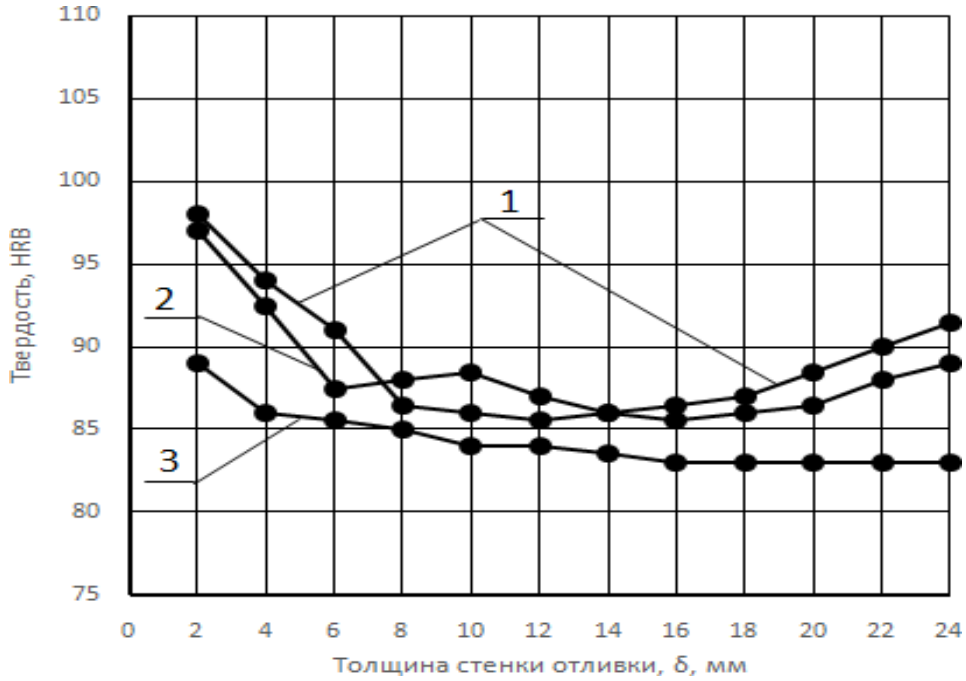


а *б* *а* *б* *а* *б*

а - 0,1% Ni ; *б* - 0,5% Ni ; 1 – поверхова зона з боку кристалізатора; 2 - середня зона; 3 - зона зі сторони стрижня

Рисунок 3.1 – Мікроструктура чавуну, легованого нікелем

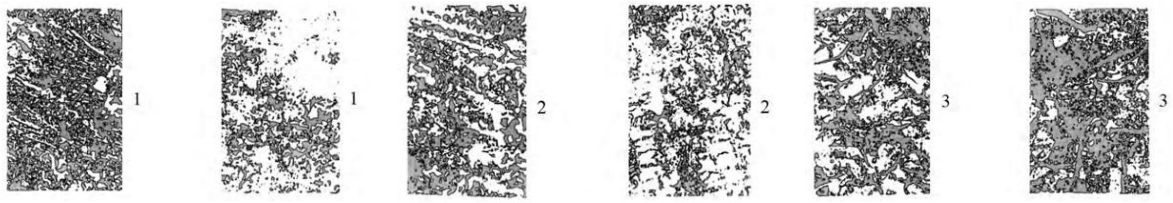
Збільшення добавки нікелю від 0,1 до 0,5 % призводить до збільшення твердості, про що свідчить розподіл твердості перерізу зразків.



1 - 0,5% Ni; 2 – 0,3% Ni; 3 – 0,1% Ni

Рисунок 3.2 – Зміна міцності за перерізом виливки

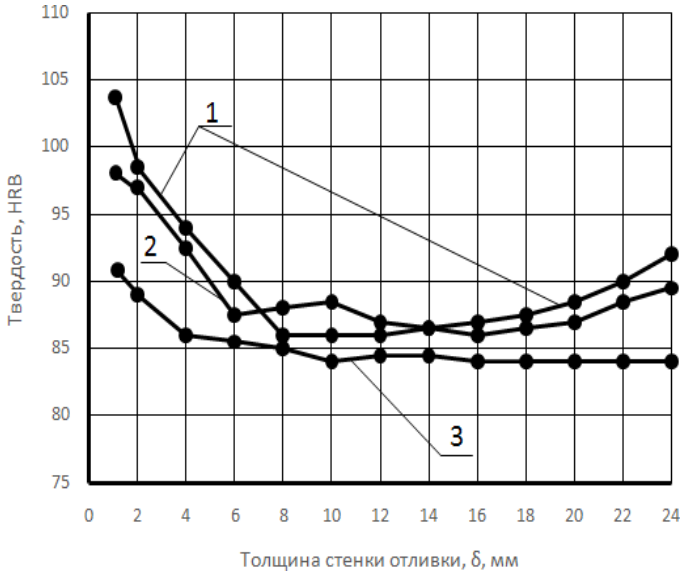
На рис. 3.3, 3.4 наведено мікроструктури і зміна міцності за перетином зразків легованих хромом. Дія хрому міцність при евтектоїдному перетворенні помітна навіть при невеликих добавках, він стабілізує перліт, проте при евтектичному перетворенні він надає сильне карбідостабілізуючий вплив . Структура та властивості неоднорідні по перерізу виливки. Збільшення кількості введеного хрому від 0,1 до0,5% призводить до підвищення твердості у поверхневому шарі. Структура чавуну з міждендритним гніздоподібним графітом (Гф4), розподіленим нерівномірно (Гр8), розміром до 25 мкм (Гразм . 25), у кількості 5–8 % (Г8), простягається на глибину 2 мм та 2,5 мм, при 0,1 та 0,5 % хрому, відповідно. Ферріта в чавуні до 50%, решта - пер- літ . На глибині 12 мм графіт пластинчастий (Гф2), розподілений рівномірно (Гр1), довжиною 30-60 мкм (Гразм.45), в кількості, більшому 12 % (Г12); графіт розподілений в перлітної матриці (П90).



а *б* *а* *б* *а* *б*

а - 0,5% Cr ; *б* - 0,1% Cr ; 1 – поверхова зона з боку кристалізатора; 2 - середня зона; 3 - зона зі сторони стрижня

Рисунок 3.3 – Мікроструктура чавуну, легованого хромом:



1 - 0,5% Cr ; 2 – 0,3% Cr ; 3 - 0,1% Cr

Рисунок 3.4 - Зміна міцності перерізу виливки

Розчиняючись у цементиті, хром посилює зв'язок між вуглецем і залізом і перешкоджає евтектоїдному розпаду цементиту на графіт та ферит. Тому в хромистих чавунах із підвищеними добавками 0,3%, 0,5% хрому в матриці центральних зон фериту) твердість по перерізу зразка вагається в діапазоні 90-84 HRB.

Цілком очевидно, що при комплексному легуванні харак тер структуроутворення чавуну буде суттєво змінюватись.

Для практики ливарного виробництва представляє інтерес чу- гун економно легований одночасно хромом та нікелем. Такі склади чавунів використовують для виливків циліндропоршневої. групи для двигунів та

компресорів.

З метою вивчення спільного впливу хрому і нікелю на структуру та властивості чавуну виконано математичне планування експериментів.

За технічними умовами на виливок із чавуну легованого хромом і нікелем обмежені такі параметри як, кількість цементиту в структурі чавуну, твердість і перепад твердості по перерізу. Методом математичного планування експериментів вирішували завдання побудови математичної моделі, що пов'язує величини цих параметрів із вмістом легуючих елементів при заданих технологічних умовах: температура заливки, швидкість руху, умови вторинного охолодження. Реалізовано дві матриці планування типу (таблиця 3.2). Після реалізації матриць планування проводили регресійний аналіз, а потім оптимізацію хімічного складу чавуну - градієнтним способом.

Регресійний аналіз результатів математичного планування експериментів проводився з метою отримання математичної моделі, зв'язуючою глибину відбілу на зовнішній поверхні зразка, що охолоджується кристалізатором, твердість чавуну поблизу поверхні, контактуючою з піщаним стрижнем і перепад твердості по перерізу.

Рівняння регресії мають вигляд:

$$Y_0 = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + A_3 X_1 X_2 \qquad (3.4)$$

Таблиця 3.2 - Планування експериментів

Рівні варіювання досліджуваних факторів	Досліджувані фактори		Відбілення, мм	Перепад міцності, В	Міцність, НВ
	вміст хрому, % (X_1)	вміст нікелю %(X_2)			
1	2	3	4	5	6
Основний рівень	0,30	0,45		-	-
Інтервал варіювання	0,20	0,35	-	-	-
Верхній рівень (+1)	0,50	0,80	-	-	-
Нижній рівень (-1)	0,10	0,20	-	-	-
Позначення X_0	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3
Умови вторинного охолодження	Охолодження на повітрі				
Номер дослідів 243-246	1 +1	+1	+1	4,0-4,3	69,5-70,5
По планом типу 2^2					
197-198	2+1	-1	+1	2,3-2,5	34,0-35,0
258-260	3+1	+1	-1	6,0-6,2	104-106
175-177	4+1	-1	-1	3,2-3,3	59,5-60,5
Умови вторинного охолодження	Екранування				
Номери дослідів 227-229	1+1	+1	+1	3,0-3,2	57-59
По планом типу 2^2					
184-186	2+1	-1	+1	1,4-1,5	27,5-28,5
239-241	3+1	+1	-1	2,2-3,5	89-91
167-169	4+1	-1	-1	2,1-2,2	51-53

Результати обчислень зведені в таблицю 3.3, з якої вид- але , що все коефіцієнти статистично значущі, так як вони більше довірчих інтервалів:

$$A_0 > Д$$

Таблиця 3.3 - Результати регресивного аналізу

а) охолодження на повітрі

Код	A_0	A_1	A_2	A_3	Д
Y_1	2,51	1,15	-0,70	-0,27	0,11
Y_2	67,50	20,00	-15,00	-2,5	0,92
Y_3	218,75	32,75	1,25	-8,75	1,07

б) екранування

Код	A_0	A_1	A_2	A_3	Д
Y_1	2,51	0,71	-0,24	0,11	0,10
Y_2	57,00	17,00	-14,00	-2,00	0,92
Y_3	205,70	28,75	1,25	-7,25	0,92

В умовах охолодження на повітрі математична модель видається наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} Y1 &= 2{,}51 + 1{,}15\,X1 + 0{,}70\,X2 - 0{,}27\,X1X2; \\ Y2 &= 67{,}5 + 20{,}0X1 - 15X2 - 2.5X1X\,2; \\ Y3 &= 218{,}75 + 32{,}75\,X\,1 - 1{,}25\,X\,2 - 8{,}75\,X\,1\,X\,2. \end{aligned} \qquad (3.5)$$

При використання екранування математична модель процесу представляє систему з 3-х рівнянь аналогічного виду:

$$\begin{aligned} Y1 &= 23{,}51 + 0{,}71\,X1 - 0{,}24\,X2 - 8{,}75\,X1X2; \\ Y2 &= 57 + 17X1 - 14X2 - 2X1X2; \\ Y3 &= 205{,}5 + 28{,}75\,X\,1 + 1{,}25\,X\,2 - 7{,}25\,X\,1\,X\,2. \end{aligned} \qquad (3.6)$$

У математичних моделях прийнято позначення:

Y_1 – значення глибин відбілу ;

Y_2 – перепад твердості по перерізу;

Y_3 – твердість поблизу поверхні;

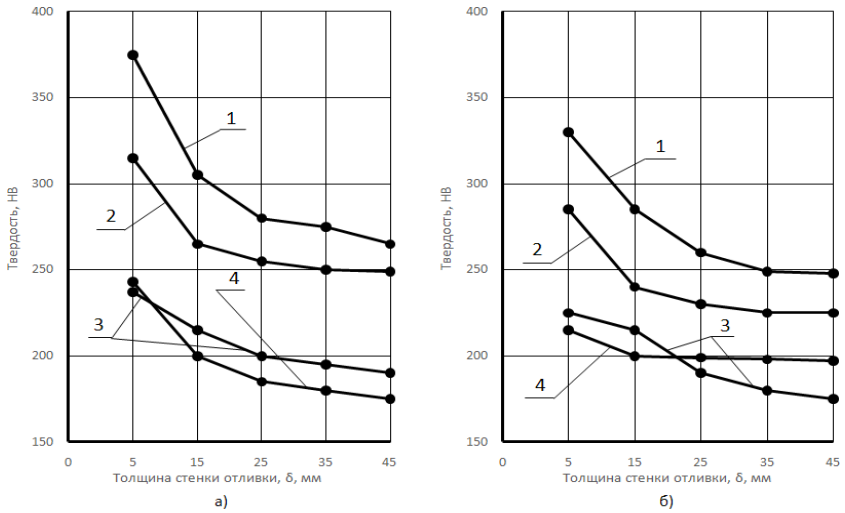
X_1 – вміст хрому;

X_2 – вміст нікелю.

З рівнянь (3.5) та (3.6) слід, що глибина відбілу (Y_1) в значною ступеня залежить від вмісту хрому. При збільшення кількості хрому в чавуні глибина відбілу зростає. З збільшенням відсоткового змісту нікелю глибина відбілу зменшується.

Різниця у розподілі твердості за перерізом залежить від вмісту хрому та нікелю. На поверхневу твердість чавуну сильне вплив надає хром і значно менше - нікель.

Аналіз рівнянь показує, що зміна умов вторинно-го охолодження не змінює характеру впливу хрому та нікелю на параметри оптимізації, хоча за зниження швидкості вторинного охолодження вплив факторів на параметри кілька зменшується.



а - при охолодженні на повітрі:

1 - 0,1% Cr , 0,8% Ni ; 2 - 0,5%Cr, 0,8% Ni;

3 - 0,5% Cr, 0,1% Ni; 4 - 0,1% Cr, 0,1% Ni;

б – екранування:

1 – 0,1% Cr 0,8% Ni ; 2 – 0,5% Cr 0,8% Ni ;

3 - 0,5% Cr , 0,1% Ni ; 4 - 0,1% Cr , 0,1% Ni.

Рисунок 3.5 - Розподіл твердості перерізу виливкапри різних режимах охолодження

Хімічний склад відповідає даним матриці планування (таблиця 3.2). У поверховій зоні мають місце високі знання твердості. Характер розподілу твердості по перерізу всіх зразках однаковий: високі значення твердості у зовнішній поверхні, низькі - біля поверхні, що контактує з піщаним стрижнем. Найбільший перепад твердості перетину спостерігається при максимальному вмісті хрому та мінімальному вмісті нікелю. Для цих складів характерна і найвища жорсткість. Криві розподілу твердості для чавуну, у якого міститься 0,5% хрому і 0,1% нікелю, розташовані вище за всіх інших. Перепад твердості тут становить 110–120 НВ. Для цих складів позначається дія хрому, як елемента, що сприяє утверення цементитної евтектики і тим самим підвищує твердощ . При збільшенні відсоткового змісту нікелю до 0,8%значення твердості знижуються незначно.

До значного зменшення твердості та перепаду її по січіню наводить зниження кількості хрому до нижнього рівня -0,1%. Зміна вмісту нікелю практично не змінює міцність та характер розподілу її по перерізу.

З порівняння графіків , представлених на рисунках 3. 7 *а* і *б* , видно, що на твердість чавуну помітно впливає зміна умов вторинного охолодження. Так, якщо для чавуну, що містить 0,5% хрому та 0,8% нікелю, при охолодженні на повітрі твердість поблизу зовнішньої поверхні становить 380 НВ, то при використанні екранування твердість у цих місцях становить 330 НВ. Аналогічно змінюється значення твердості і в інших точках перерізу.

З аналізу розподілу твердості видно, що при безперервності - ном лиття можна помітно змінювати твердість виливків варіювання кількості добавок хрому та нікелю. При цьому важливу роль надають умови вторинного охолодження.

Після отримання рівнянь регресії (3.5) та (3.6) градієнтним способом проводили оптимізацію хімічного складу економно легованого хромом та нікелем чавуну для умов безперервного лиття. За параметри оптимізації, з урахуванням вимог технологіїческих умов, прийняті такі обмеження:

глибина відбілу з зовнішньої поверхні має бути мінімальною, перепад твердості по перерізу повинен перебувати в межах 55-60 НВ, а твердощ поблизу поверхні, що контактує з піщаним стрижнем, повинна перебувати в межах 190-200 НВ.

При оптимізації хімічного складу методом градієнтного спуску отримані наступні результати.

Мінімальна глибина відбілу із зовнішньої поверхні в умовах вторинного охолодження виливки на повітрі складає 0,9 ммпри вмісті хрому 0,17%, а нікелю – 0,575%. Зміст хромуі нікелю визначено з даних оптимізації: X_1 = -0635; X_2 =0,369; Y = 1,596.

Таблиця 3.4 - Обмеження параметрів при оптимізаціїхімічного складу чавуну

а) охолодження на повітрі

Код	Індекс обмеження	A_0	A_1	A_2	A_3	Значення обмеження
Y_1	-	2,51	1,15	-0,70	-0,27	
Y_2	-1	67,50	20,00	-15,00	-2,50	55
Y_2	1	67,50	20,00	-15,00	-2,50	60
Y_3	-1	218,75	32,75	1,25	-8,75	190
Y_3	1	218,75	32,75	1,25	-8,75	200

б) екранування

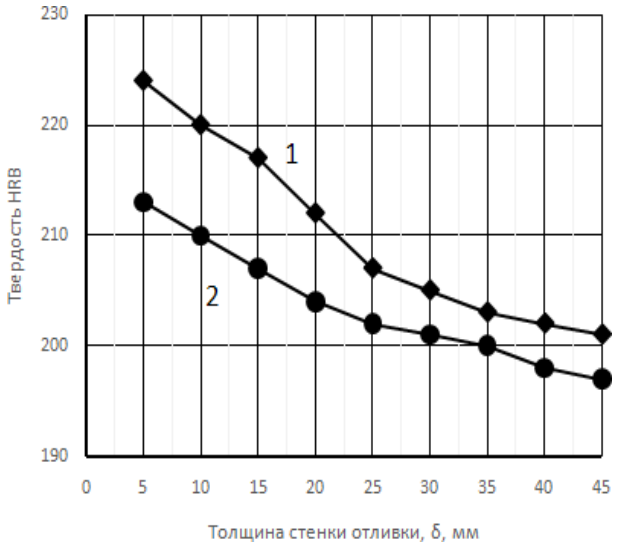
Код	Індекс обмеження	A_0	A_1	A_2	A_3	Значення обмеження
Y_1	-	251,00	0,71	-0,24	0,11	
Y_2	-1	57,00	17,00	-14,00	-2,00	55
Y_3	1	57,00	17,00	-14,00	-2,00	60
Y_3	-1	205,70	28,75	1,25	-7,25	190
Y_3	1	205,70	28,75	7,25	-7,25	200

Спрощення умов вторинного охолодження виливки за рахунок екранування дозволяє отримати мінімальну глибину відбілу, рівну 1,5 мм для заданих обмежень твердості та перепаду її за перетином, при вмісті хрому 0,23% та нікелю - 0,47%. Dvscn хрому і нікелю визначено по даними оптимізації: $X_1 = 0,323$; $X_2 = 0,114$; $Y = 2,25$.

З урахуванням умов охолодження виливків за межами кристалізатора рекомендуються такі склади чавуну, економнолегованого хромом і нікелем:

- при охолодженні виливків за межами кристалізатора на воз- дусі оптимальним для товстостінних заготовок є склад, (%): C = 3,0-3,2; Si = 1,8-2,0; Mn = 0,8-0,9; Cr = 0,16-0,18; Ni = 0,56- 0,58;
- при уповільненою швидкості вторинного охолодження виливок (екранування, томильні колодязі) оптимальним є зі- став, %: З = 3,0-3,2; Si = 1,8-2,0; Mn = 0,8-0,9; Cr = 0,22-0,24; Ni = 0,48–0,5.

Експериментальні результати виміру твердості розроблених складів чавуну показані на рис.- 3.6.



1 – при охолодженні повітря; 2 – при повільній швидкості вторинного охолодження

Рисунок 3.6 - Залежність твердості чавуну від відстані по товщині стінки виливки

Верхня крива – твердість перетину в умовах охолодження виливки на

повітрі, нижня – при уповільненій швидкості вторинно- го охолодження за рахунок екранування. Твердість поблизу поверхнясті , що контактує з піщаним стрижнем, становить 198 НВ – при охолодженні на повітрі та 202 НВ – при уповільненій швидкості вторинного охолодження. Перепад твердості по перерізу не перевищує 30 НВ на відстані 5 мм від зовнішньої та внутрішньої поверхні.

При охолодженні повітря. На зовнішній поверхні графіт має міждендритну форму ГФ-10, характер розподілу соотвітує Гр9, довжина включень 5-10 мкм (ГД2). З віддаленням від зовнішньої поверхні форма графіту змінюється до дрібнопластинчатою у поєднанні з графітом компактної форми. Форма графіту ДФ4, довжина включень 40-100 мкм (ГД5-ГД6). Далі форма та розподіл графіту практично не змінюються аж до поверхні, контактуючою з піщаним стрижнем.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз мікроструктури сплавів на основі заліза у процесі безперервного лиття. Проведено регресійний аналіз та оптимізацію хімічного складу легованого чавуну.

2. Проведено структурно-фазовий аналіз легованих сплавів на основі заліза. Встановлено залежності функціональних властивостей сплавів від умов охолодження, товщини стінок виливків та зон охолодження.

3. Проведено оцінку залежності значень глибини відбілу, твердості по перерізу виливка, поверхневої міцності від вмісту хрому та нікелю.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Шкідливі та небезпечні фактори виробничого середовища

Небезпечні і шкідливі виробничі фактори проявляють себе постійно або періодично. До постійним діючим небезпечним і шкідливим виробничим чинникам ставляться рухомі частини механізмів і устаткування, переміщення вантажів, обертові теплові випромінювання, шум, вібрація, до періодичних належать - розплавлений метал, запиленість, загазованість та інші.

Показником, що характеризує періодичні та шкідливі виробничі фактори, є їх частота. Так, при виплавці сталі відбуваються екстремальні відхилення технологічного процесу, що супроводжуються викидами розплавленого металу і шлаку, які створюють небезпечний виробничий фактор. Небезпечні виробничі фактори виникають також при заливці чавуну, при випуску сталі.

Порушення технологічного процесу може бути пов'язано з можливістю прориву, викиду, виплеску розплавленого металу і шлаку, раскисляющих матеріалів. Тому виробничі площі навколо пічних агрегатів являють собою небезпечну зону, в межах якої вимагається постійний контроль заходів безпеки. До небезпечних зон відносяться території у розплавленого металу і шлаку, у розливних ковшів, навколо працюючого устаткування крана. Допуск в небезпечну зону дозволений тільки особам, безпосередньо які працюють на цих ділянках.

Виробничі шкідливості у вигляді газу, пилу, шуму, вібрації, високої температури в результаті дії на організм людини можуть викликати порушення нормальної діяльності і привести до втрати працездатності, класифікованої як професійні отруєння і захворювання.

При дії електричного струму виникають електротравми – електричний удар, опік. Електричний удар можливий при зіткненні з

токоподводящими частинами обладнання. При цьому велике значення мають температура і вологість зовнішнього середовища, з підвищенням яких тяжкість ураження зростає.

У металургійному цеху існує можливість ураження працюючих електричним струмом в районі механізмів повороту, на траншеях електромастових кранів, в електрощитових. Всі електронебезпечні місця повинні бути захищені, на них повинна бути вивішена відповідна табличка.

Згідно ГОСТ 12.1.003-76, у виробничих приміщеннях шум не повинен перевищувати 85 дБ. Ефективним засобом зниження шуму є спеціальні звукоізолюючі кожухи. Рекомендується виконати звуко- тепло-ізолюючі кожухи з листової сталі. Внутрішню його частину потрібно покрити теплоізоляційним матеріалом, який одночасно служить і звукопоглиначем [18].

4.2 Захист від впливу небезпечних факторів

Передове металургійне підприємство забезпечується комплексом спеціальних технічних засобів, що забезпечують безпечні умови праці. До таких засобів належать захисні пристрої, спеціальні установки та інші види обладнання.

В цеху навколо небезпечних зон, обертових частин потрібно встановлювати огородження, обладнати робочі місця звуковий та/або світловою сигналізацією, для безпечного пересування трудящих потрібно встановити пішохідні тротуари і тунелі.

В цілях боротьби з електротравматизмом потрібно встановити навколо електричних установок і пристроїв стаціонарні захисні пристрої, що захищають від випадкового дотику до струмоведучих частин і окремих елементів. Розподільні електричні установки та пристрої напругою понад 1000 В повинні бути обладнані захисними сітчастими пристроями з

розмірами комірок 20х20 мм При обслуговуванні електроустановок використовувати індивідуальні захисні засоби.

Температурний режим у виробничих приміщеннях залежить від величини тепловиділень обладнання, агрегатів і готової продукції.

Ефективним засобом зниження шкідливої дії теплових виділень є максимальне скорочення часу знаходження нагрітого металу і шлаку в виробничих приміщеннях. Для зниження дії теплових випромінювань на організм людини встановити в цеху раціональний питний режим – на робочих майданчиках передбачити постачання робітників підсоленою газованою водоцй, квасом, білково-вітамінних напоєм.

Від впливу теплового випромінювання передбачити захист робочих місць тепловими екранами. Екрани захищають робочі місця від дії променистої енергії.

Особливо важливим є розробка заходів по забезпеченню виробничої санітарії. Цехи металургійних заводів за характером і обсягом виділяються в навколишнє середовище шкідливостей відносяться до підприємств 1-го класу.

Стіни цехів зазвичай виконані з цегли і металевого листа. На ділянках стін, виконаних з металевого листа, передбачається можливість відкриття їх влітку для провітрювання приміщень і закривання в холодний час – для зменшення протягів і втрат тепла. У холодну пору передбачається використання газових пальників у вигляді спеціально обладнаних печей.

Одним з найважливіших параметрів виробничої обстановки є освітлення. Раціональне освітлення забезпечує достатні умови для виконання працівниками своїх функціональних обов'язків.

До освітлення виробничих приміщень пред'являються наступні вимоги: забезпечення достатньої освітленості на працюючих поверхнях, висока якість, надійність, зручність управління і обслуговування, забезпечення пожежної та електробезпеки.

У світлий час дня в цеху передбачається природне освітлення, при роботі в нічний час застосовується індивідуальне освітлення.

4.3 Забезпечення пожежної безпеки

Згідно СНіП 2.01.02-85 виробництво по вибухо- і пожежонебезпеки розподіляються на шість категорій, визначальних наступним чином:

"А" і "Б" - вибухопожеженебезпечні ;

"В", "Г", "Д" - пожеженебезпечні ;

"Е" – вибухонебезпечні.

До вибухонебезпечних категорій "А" віднесені виробництва, які пов'язані з застосуванням речовин, здатних вибухати і горіти при взаємодії з водою, киснем повітря: горючих газів, рідин з температурою спалаху пари до 28 ^{про} З , за умови, що зазначені гази і рідини зможуть утворювати вибухонебезпечні суміші.

До вибухонебезпечних категорій "Б" віднесені виробництва, пов'язані із застосуванням горючих газів, межа вибуховості яких понад 10% до об'єму повітря; рідини з температурою спалаху пари від 28 до 61 ^{про} З; рідин, нагрітих в умовах виробництва до температури спалаху і вище.

До пожеженебезпечним категорій "В" віднесені виробництва, пов'язані із застосуванням рідин з температурою спалаху пари понад 61^{про}С; горючого пилу чи волокон, межа вибуховості яких понад 65 г/м3; твердих згорілих речовин та матеріалів.

До пожеженебезпечної категорії "Г" належать виробництва, пов'язані з застосуванням негорючих речовин і матеріалів в гарячому або розплавленому стані, процес обробки якого супроводжується виділенням променистого тепла, іскор або полум'я; твердих, рідких або газоподібних речовин, які спалюються або утилізуються в якості палива.

До пожеженебезпечної категорії "Д" віднесені виробництва, в яких не згоряють речовини та матеріали приймаються в холодному стані.

До вибухонебезпечним категоріями "Е" віднесені виробництва, пов'язані із застосуванням горючих газів без рідкої фази і вибухонебезпечного пилу в такій кількості, при якому можуть утворюватися вибухонебезпечні суміші в обсязі, що перевищує 5% об'єму приміщення.

Металургійне виробництво відноситься до категорії вибухо-пожеженебезпечних, оскільки при веденні технологічних процесів утворюються горючі гази, межа вибуховості яких у більшості випадків становить 10% до об'єму повітря.

В цілях пожежної безпеки в цеху встановлюються на робочих майданчиках пожежні щити, які повинні мати два вогнегасника ОХП-10, один вуглекислотний вогнегасник, один ящик з піском, а також пожежний рукав для гасіння пожежі водою.

Для захисту від блискавки встановлюються ізольовані від будівель громовідводи стрижневого типу. Громовідводи розташовуються рівномірно по площі горизонтальної проекції будови. Кожен з громовідводів повинен мати окремий заземлювач перерізом не менше 35 мм^2 з смугової сталі [20].

4.4 Захист навколишнього середовища

Технологічні процеси виробництва чорних металів супроводжуються утворенням величезних кількостей різної пилу та забруднюючих атмосферу газів.

Пил звичайно має щільність 4,3 г/см^3 , її кількість і склад змінюються в широких межах і залежить від багатьох факторів: від складу металу і присадок, від витрати і тиску кисню та інших технологічних газів. Середня кількість пилу, що міститься в цехових газах, становить 25-30 кг/т.

Дослідження заходів дисперсності пилу показують, що близько 80% її частинок мають розміри до 5 мкм. Кількість пилу з частинками більш 1 мкм становить 5 – 15 %.

Враховуючи дисперсний склад пилу, рекомендується встановлювати в цехах пиловловлювач УСД-ЛІОТ, робота якого заснована на використанні інерції прямолінійно рухомих частинок пилу і відцентрових сил. Ефективність уловлювача в залежності від дисперсності пилу становить 90-99 %.

Законодавство України передбачає санітарну охорону вододжерел шляхом застосування комплексу заходів, спрямованих на попередження та зниження забруднень стічними водами джерел водопостачання.

На підприємствах чорної металургії водопостачання досягає великих обсягів, тому раціональне використання води дуже важлива.

Необхідна міра очищення спускають у водойму стічних вод визначається вмістом зважених частинок, засвоєнням стічними водами розчиненого кисню, запахом, сольовим складом і температурою води, а також ГДК токсичних домішок та інших шкідливих речовин.

Для очищення стічної води ефективно використовувати механічні методи. Вони включають проціджування, відстоювання, фільтрування стічних вод. Для більш глибокого очищення води рекомендується використовувати фізико-хімічні методи.

Для охолодження стічних вод після очистки перед спуском у водойми рекомендується застосовувати розбризкують басейни, градирные вежі.

Зменшення кількості стічних вод може бути досягнуто шляхом створення безстічних схем очищення і впровадження науково обґрунтованих норм водоспоживання.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено основні джерела створення шкідливих та небезпечних умов на робочих місцях у ливарному цеху.

2. Розглянуто можливі методи захисту від впливу небезпечних факторів: електротравматизму, термічних ушкоджень та пожежної небезпеки.

3. Проведено аналіз технологічних процесів та їх вплив на навколишнє середовище. Запропоновано заходи щодо зниження можливих порушень, які підвищують небезпеку скидання шкідливих викидів у навколишнє середовище

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ширяев В.И. Пхайко Е.С. К вопросу о прокатке с одним приводным валком. *Металлургия и коксохимия*, 1979. Киев : Техника. №60. С. 36-38.

2. Николаев В.А. Углы критического сечения при несимметрической прокатке. *Металлургия и коксохимия*, 1982. Киев : Техника. № 78 С. 47-52.

3. Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Минаев А.А., Момот С.В., Белобров Ю.Н.Процессы непрерывной разливки. Донецк: ДонНТУ, 2002. 536 с.

4. Чернышев Н. Н., Комбинированная система автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. обчислювальна техніка та автоматизація*, 2013. Випуск №2(25). С. 72–78.

5. Merici technika pro zarizeni plenuleho liti. Seminar fy ABB, cerven 1989, VUI Dobra.

6. Невлюдов І. Ш., Олександров Ю. М., Андрусевич А. О., Чала О. О. Основи наукових досліджень : навч. посіб. Кривий Ріг : КК НАУ, 2017. 344 с.

7. Таран Ю. П., Николаенко А. Н. Исследование температурных деформаций алюминиевой заготовки при её непрерывном литье. *Металлург*, 2010. № 2. С. 23-31.

8. Mittler T. Continuous casting of copper compounds. *Metall*, 2017. P. 459-462.

9. Андросенко М. В., Кадошникова И. Д. Прогнозирование качества сортовых заготовок полученных способом непрерывного литья применением теории нечетких множеств. *Механическое оборудование металлургических заводов*, 2013. № 2 (2). С. 52-55.

10. Мещерякова В. Л., Казаченко О. О., Дмитров В. В. Програмне забезпечення емулятора системи діагностування теплового стану кристалізатора машини безперевного лиття заготовок. *Наукові праці*

Донецького національного технічного університету. Сер. обчислювальна техніка та автоматизація, 2018. Выпуск №2(35). С. 74 – 78.

11. Green D. Conform a new method for the continuous forming of metals. D. Green Brit. Ind. 1969. № 6. P. 18–19.

12. Green D. The continuous extrusion forming of wire sections. D. Green. TRG Report. 1972. July.

13. Патент США № 2710433. Continuous metal casting machine. Apl. Ilario Properzi. Заявл. 25.02.1949. Опубл. 14.06.1955. НКИ 22 – 57.4.

14. Bryant A., Dixon W. Isothermal Extrusion. *Light Metal Age*, 1999. No. 3–4. P. 8–36.

15. Nippon Steel and Sumitomo Metal (2015) Rails. http://www.nssmc.com/product/catalog_download/pdf/K003en.pdf

16. Lally B., Biegler L., Henein H. (1990) Finite difference heat-transfer modeling for continuous casting. *Metallurgical transactions B*, 1990. 21B. P. 761–770.

17. Мочалов А. А., Евфимко К. Д., Шаповал Н. А. Математическая модель намораживания металла на закристаллизовавшийся слиток. *Процессы лиття*, 2010. № 3. С. 24–29.

18. Николаев В.А. Технология прокатки сортовых профилей. Киев : УМК МО. 1988. С. 130.

19. Чубенко В., Ярош Т., Хіноцька А. Удосконалення процесу виготовлення металевих виробів у машинах безперервного лиття заготовок. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, 2026. 1(53). С. 222–229. https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359811.

20. Grzyb R., Misiolek Z. The experimental investigations on the Force Parameters and metal flow in the combined process of Rolling and Extrusion. *Archiwum Hutnitwa*, 1983. No. 3. Vol. 28. P. 321–340.

21. Патент США № 2710433. Continuous metal casting machine. Apl. Ilario Properzi. Заявл. 25.02.1949. Опубл. 14.06.1955. НКИ 22 – 57.4.

22. Пат. України 146555. МКП B22D 11/06. Установка для непрерывного литья и прессования металла методом конформ . Ю.В. Горохов, С.В. Беляев, В.Г. Шеркунов . Опубл. 10.10.2014. Бюл. № 28.

23. Пат. України 102550. МКП B21C 23/08. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла / С.В. Беляев, С.Б. Сидельников, Ю.В. Горохов [и др.]; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7.

24. Мочалов А. А., Евфимко К. Д., Шаповал Н. А. Интенсификация процесса кристаллизации непрерывного слитка. *Процессы литья*, 2009. № 6. С. 50–53.

25. Hills R. N., Loper D. E., Roberts P. H. Q. J. Mech A thermodynamically consistent model of a mushy zone. Appl. Math., 1983. No 36. P. 505–539.

26. Баптизмамский В. И. Разливка стали. Киев-Донецк. Вища школа. 1977. 197 с.

27. Talmon Y., Davis H. T., Scriven L. E. Progressive freezing of composites analyzed by isotherm migration methods. *AIChE Journal*, 1981. Vol. 27. № 6. P. 928–937. doi:10.1002/aic.690270608

28. Talmon Y., Davis H. T. Analysis of Propagation of Freezing and Thawing Fronts. *Journal of Food Science*, 1981. Vol. 46. № 5. P. 1478–1488. doi:10.1111/j.1365-2621.1981.tb04202.x

29. Смирнов А.Н., Сафонов В.М., Дорохова Л.В., Цупрун А.Ю. Металлургические мини-заводы. Донецк: ДонНТУ, 2005. 469 с.

30. Hills R. N., Loper D. E., Roberts P. H. A thermodynamically consistent model of a mushy zone. Q. J. Mech. Appl. Math., 1983. No 36. P. 505–539.

31. Авдонін Н.А. Математичний опис процесів кристалізації. Рига: Зінатне, 1980. 180 с.

32. Іванова А.А. Дослідження температурних градієнтів безперервного злитка. *Праці ІПМ НАН України*, 2008. С. 93–102.

33. Огурцов А.П., Гресс А.В. Безперервне лиття сталі. *Системні технології*, 2002. 675 с.

34. Тітова Є. С., Сокол А. М., Тітова Т. М. Математична модель процесу кристалізації маломірної мідної і сталемідної заготовок в кристалізаторі. *Математичне моделювання,* 2011. № 1(24). С. 64—68.

35. Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Киев : Наука. 1995. 343 с.

36. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали. Алчевск: ДонДТУ, 2010. 520 с.