

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУСПЕНЗІЙНОЇ РОЗЛИВКИ РІДКОЇ СТАЛІ
У ЛИВАРНО-ПРОКАТНІ КЛІТІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТОНКИХ СМУГ**

Проаналізовано суміщення процесів лиття-прокатування для виготовлення металовиробів, що дозволяє зменшити витрати енергії на процес, собівартість прокатного виробництва, збільшити продуктивність праці, покращити якість продукції. Визначено переваги та недоліки такого виробництва. Досліджено нову конструкцію ливарно-прокатної кліти для виготовлення тонких смуг з використанням безперервної валкової розливки рідкого металу. Пропонуємо устаткування складається з двох циліндричних горизонтальних валків, на які напресовано буртики, що забезпечує надійне утримання сталі. Запропоновано для запобігання виливання рідкого металу з поміж прокатних валків під час кристалізації застосовувати суспензійне розлиття, що дозволяє прискорити процес охолодження. Для утворення суспензії пропонується в рідкий метал додавати здрібнену сталеву стружку, яка зародить додаткові центри кристалізації. Досліджено швидкість охолодження сталі, час кристалізації та коефіцієнт витрати металу в умовах безперервної розливки у ливарно-прокатні кліти з використанням додаткових центрів кристалізації. Визначено, що швидкість кристалізації рідкої сталі збільшується на 26 – 28 %, тривалість кристалізації скорочується на 18 – 20 %, коефіцієнт витрат металу зменшується приблизно на 2 % в валках-кристалізаторах в умовах безперервної суспензійної розливки сталі в порівнянні зі звичайною валковою розливкою рідкого металу в ливарно-прокатні кліти.

Ключові слова: валкова розливка, безперервне розлиття рідкої сталі, виготовлення смуг, швидкість охолодження, час кристалізації, витрати металу, ливарно-прокатна кліть, суспензійне розлиття сталі.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями: Розвиток промисловості ставить нові і нові завдання з підвищення продуктивності машин та апаратів, економії матеріалу та енергоресурсів, збільшенню міцності та довговічності металовиробів, що потребує подальшого удосконалення процесів обробки металів тиском. Це можна досягти завдяки суміщенню процесів лиття-прокатування при виготовленні виробів. Очевидними перевагами таких процесів, як правило, є низька капіталосміність, низький рівень екологічних забруднень, мінімальні прості устаткування, відносно короткий виробничий цикл за максимальної продуктивності та рентабельності.

Особливо помітні результати дає впровадження безперервної валкової розливки металу у валки-кристалізатори, яка на теперішній час досягла суттєвих позитивних результатів.

Тому удосконалення процесу валкової розливки рідкого металу для виготовлення металовиробів та валкових ливарно-прокатних машин для здійснення цього способу виробництва є задачею актуальною, вирішення якої дозволить збільшити швидкість охолодження рідкої сталі та зменшити час кристалізації металу, що дозволить зменшити коефіцієнт витрати металу при безперервній валковій розливці.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Важливим нововведенням металургії є дослідно-промислові агрегати прямого безперервного розливання сталі безпосередньо на тонку смугу. Основна перевага прямого відливання тонкого листа – виключення із технологічної схеми операції гарячого прокатування з відповідним скороченням устаткування, а також енерго- та трудовитрат [1 - 11].

В агрегатах прямого відливання тонкого листа кристалізатор складається з двох валків, які розташовано безпосередньо під проміжним ковшем і обертається в протилежних напрямках. Рідка сталь при розливанні надходить у простір між валками і при контакті з поверхнею валків кристалізується, утворюючи затверділі шари, які рухаються разом з поверхнею і виходять із валків у формі листа, товщина якого визначається відстанню між валками, а ширина бічними стінками кристалізаторів [1].

На відміну від звичайного безперервного лиття-прокатування сталевих виробів, при валковому литті має місце два суміщених процесу: кристалізація розплаву і пластична деформація спочатку тієї частини, що закристалізувалася, а потім і всієї маси металу [5]. В процесі кристалізації відбувається м'яке обтиснення сталі, при виході з кліти-кристалізатора смуга отримує подальше охолодження і надходить у прокатну кліть [6].

Технологічна схема отримання тонкого листа із застосуванням двовалкових машин безперервного лиття заготовок дозволяє у 8 – 10 разів зменшити витрати енергетичних ресурсів, у 40

– 50 разів скоротити втрати металу в окалину, у 5 – 10 разів підвищити продуктивність праці, що забезпечує економічну доцільність подальшого розвитку та удосконалення технологічних процесів [5]. Але нова технологія має і недоліки: ширина смуг не регулюється і коливається за довжиною.

Існують технології, де рідку сталь пропонується розливати безпосередньо в консольні прокатні валки, які є кристалізаторами [6-11] і швидко зменшувати перегрів металу перед розливанням використовуючи суспензійне розлиття [12].

Однією з переваг суспензійного розлиття є можливість утилізувати металовідходи (стружки, обрізи, недоливів, вирубки). Найбільш суттєва відзнака суспензійного лиття в порівнянні з іншими способами є реалізація внутрішнього тепловідвіду за допомогою теплостоків інокуляторів для інтенсифікації теплопереносу в рідкій фазі з накладенням зовнішньої дії.

Дослідженнями доведено [12], що швидкість кристалізації розплаву зі сталі 35 при введенні залізо містких добавок збільшується з 0, 15 мм/с (при литті без добавок) до 0,2-0,8 мм/с (при додаванні залізного порошку).

Для досягнення максимального теплофізичного ефекту істотно регулювати параметри дисперсного інокулятора таким чином, щоб частинки повністю розплавлялися до миті досягнення температури ліквідус. Тому важним параметром технологічного процесу суспензійного лиття сталі є розмір частки дисперсного інокулятора [12]. Оптимальний розмір частинки можна установити, визначив тривалість нагрівання і плавлення часток і порівнявши її з часом досягнення кромки смуги температури ліквідус. Для цього було досліджено процеси теплообміну і кінетики плавлення частинок в залежності їх форми та розмірів, маси добавки та температури перегріву рідкої сталі.

Виконано патентний пошук на предмет удосконалення ливарно-прокатних модулів [13], що дозволило вивчити динаміку розвитку і впровадження ливарно-прокатних агрегатів в Україні та Росії з 2000 по 2013 года. Даний аналіз дає можливість визначити переваги та недоліки в використанні таких агрегатів та виявити подальший напрямок дослідження зі зменшення перегріву металу при безперервній розливці сталі у валки-кристалізатори, що забезпечує можливість суміщення процесів лиття-прокатування.

Перспектива інтенсифікації безперервної розливки сталі лімітується, головним чином, обмеженістю швидкості затвердіння безперервно литого зливка.

Цей процес пов'язаний з складністю відведення фізичної та скритої теплоти металу, що кристалізується тому визначається його теплофізичними властивостями: теплопровідністю, температуропровідністю, теплоємністю та інш [12].

Одним з недоліків розливки сталі у валки-кристалізатори є те, що рідку сталь складно утримати в міжвалковому просторі тому, що вона має велику рідинну текучість в розплавленому стані і має здібність виливатися, що призводить до втрат готової продукції. Тому необхідно удосконалити конструкцію валків-кристалізаторів, що буде перешкоджати виливанню рідкої сталі при розливці, а також передбачати дії зі зменшення її перегріву при попаданні в міжвалковий простір, що можливо при утворенні в об'ємі металу додаткових центрів кристалізації у валках - кристалізаторах при валковій безперервній розливці.

Постановка завдання: визначити збільшення швидкості охолодження та зменшення часу кристалізації металу, коефіцієнт витрати рідкої сталі за новою технологією з використанням пропонуємого обладнання з метою дослідження ефективності використання суспензійного розлиття рідкої сталі при безперервній валковій розливці у ливарно-прокатні кліті для виготовлення тонких смуг

Викладення матеріалу та результати: В дослідженнях швидкості охолодження та кристалізації рідкої сталі, коефіцієнту витрат металу при безперервній валковій розливці використовувалась низьковуглецева сталь, яка виливалася з ковша безпосередньо в горизонтальні прокатні циліндричні валки, які обертаються в протилежним напрямках. Робочі валки в цьому випадку слугують одночасно кристалізаторами-охолоджувачами і обтискним інструментом, де суміщаються процеси охолодження і прокатування сталі з обтисненням, що забезпечує витягування матеріалу. Валки установлені горизонтально так, як показано на рисунку 1 і безперервно охолоджуються водою. З бункерів з обох боків на торці валків-кристалізаторів насипається металева стружка. Робочі валки виготовлені з міді і покриті нікелем, на торці валків-кристалізаторів напрусовано з натягом буртики (рис. 1) [14]. Конструкція окремого валка пред-

ставлено на рисунку, де показано його з'єднання з буртиком. Така конструкція служить для утримання здрібноної стружки і попередження виливання рідкої сталі між робочими валками, що дозволяє збільшити випуск готової продукції.

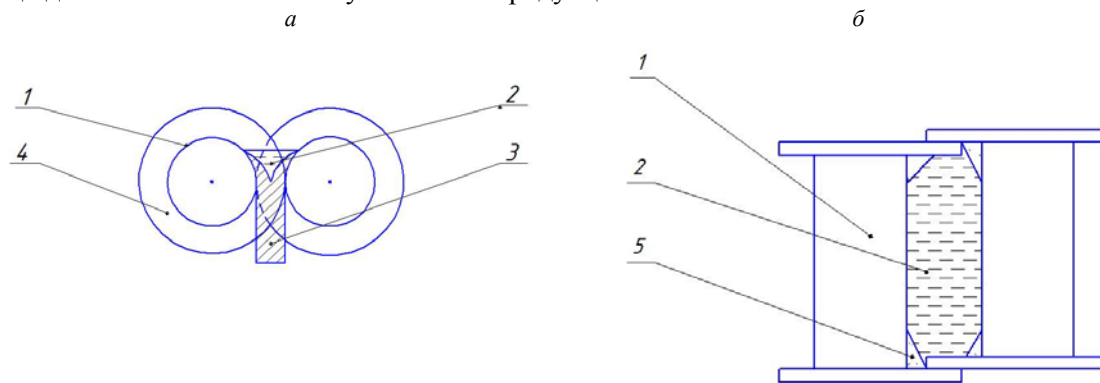


Рис. 1. Ливарно-прокатна кліть [14]: *a* - вигляд збоку; *б* - вигляд зверху;

1 – прокатні валки-кристалізатори; 2 – рідка сталь; 3 – затравка; 4 – напесовані буртики; 5 – здрібнена стружка

У дослідженнях було використано суспензійну розливку рідкої сталі у валки-кристалізатори, що дозволяє скоротити тривалість затвердіння зливка та збільшити коефіцієнт використання рідкої сталі та якість отриманого виробу. Одним з важливих етапів практичної реалізації суспензійного розливання як метода інтенсифікації затвердіння безперервно литих зливків є розробка ефективних технологічних процесів, простих та надійних устаткувань для її здійснення. Устаткування, що розробляються повинні мати високу надійність та стабільність в відповідності з тривалістю розливання. Розроблено велику кількість устаткувань, що дозволяють вводити дисперсний матеріал в рідку фазу [12]. Але такі устаткування мають де-які недоліки: частина дробі не попадає в струю, відображуючись від неї або пролітаючи повз неї, існує можливість замороження краплин на вихідному отворі сопла. Для уникнення цього недоліку, з боку, протилежного введенню феромагнітних дисперсних часток, утворюють спрямовано електричне поле. Але на практиці цей метод викликає ускладнення: частина дробинок притягується до магніту, утворюючи так звану бороду. Відомі багаточисельні пропозиції та розробки технологічних процесів затвердіння безперервнолитих зливків обертанням рідкої фази, накладенням коливальних, вібрацій та інших взаємодій магнітних полів. Недоліками таких способів є складнощі регулювання та стабілізації технології в промислових умовах розлиття сталі на машинах безперервного лиття. В дослідженнях використовувалися конусні бункери, які були встановлені з обох боків валків-кристалізаторів.

З метою утилізації відходів механообробного виробництва в дослідженнях для утворення суспензії використовувалася стружка, яка здрібноувалася до розмірів менше міліметра.

Використовувалося обладнання для дослідження: ливарно-прокатна кліть, яка включає два циліндричні горизонтальні валки- кристалізатори, що встановлені в підшипники в станині. На бочку кожного з валків з обох сторін напесовані з гарантійним натягом диски, при цьому відстань між правим та лівим диском на валку дорівнює ширині виготовляемого листа та товщині диску, відстань між валками дорівнює товщині виготовляемого листа, при цьому буртики суміжних валків перекривають один одного.

В результаті досліджень було визначено швидкість та час охолодження металу, час кристалізації та коефіцієнт витрати рідкої сталі при виготовленні штаби в умовах валкової безперервної розливки сталі. Для порівняння досліджувалася розливка з використанням суспензії та без використання. В дослідженнях змінювалася величина зазору між валками, що дозволяло отримати декілька смуг різної товщини. Температура лиття залишалася постійною і дорівнювалася 1580 °С.

Для утворення суспензії в дослідженнях в рідкий метал додавалася здрібнена металева стружка, яка сипалася з бункера на бокові сторони валків-кристалізаторів, які обертаються. Буртики її стабілізували у вигляді тригранної піраміди, що надійно утримувало рідку сталь і дозволяло їй швидко кристалізуватися.

Дослідження проводилися за наступною методикою: з ковша на горизонтальні циліндричні валки-кристалізатори (рисунок 1), які обертаються (1) виливалася рідка сталь (2), одночасно з цим насипали на валки-кристалізатори з двох бункерів, що встановлені з обох боків валків, шар здрібненої стружки (5) у вигляді тригранної піраміди. Для стабілізації цієї піраміди на кінцях валків напресовано буртики (4), для підтримання рідкої сталі використовувалась затравка (3), яка до початку розливки рідкої сталі була введена в робочу порожнину кристалізатора.

Устаткування, що пропонується для проведення експериментів, забезпечує утримання рідкої сталі прокатними валками до початку затвердіння: рідка сталь вступає у взаємодію із стружкою, яка добре утримується на валках завдяки буртикам, що затримують виливання рідкої сталі з міжвалкового простору і дозволяє підвищити вихід готової продукції.

Таким чином, була розроблена методика проведення дослідження ефективності процесу виготовлення смуг безперервною валковою розливкою рідкого металу, де запропоновано нова технологія безперервної валкової розливки сталі у валки-кристалізатори, визначено нову конструкцію обладнання для його здійснення та підібрано матеріал для здійснення суспензійної розливки рідкого металу у валки кристалізатори [14,15].

Велике значення має бокове згущення рідкої ванни. Експерименти показали, що при використанні такого згущення рідка сталь добре утримується прокатними валками: рідкий метал взаємодіє зі стружкою, яка добре утримується на прокатних валках-кристалізаторах завдяки буртикам і швидко кристалізується з бокової поверхні, що перешкоджає її виливанню в міжвалковий простір.

Для визначення складу інокулятора, чим виступають частки здрібненої стружки з різних залізовуглецевих сплавів, проаналізовано їх теплофізичні властивості. У випадку, коли матеріал частки і кристалізуючі фази мають близькі теплофізичні характеристики (теплопровідність, теплоємність), в динаміці плавлення другий і третій періоди можна вважати як єдиний процес плавлення частки великого діаметру. Якщо частки відрізняються за хімічним складом, то процес плавлення обумовлено не тільки теплообміном, а і масо переносом. При вивченні теплофізики суспензійної розливки відливок та зливоків визначено [12], що тривалість затвердіння збільшується при збільшенні маси часток, що дозволило визначити технологічні області отримання литих матеріалів з використанням дисперсних інокуляторів, близьких за фізико-хімічними і теплофізичними властивостями до оброблюваного матеріалу.

Тому, в дослідженнях використовувалася в якості інокулятора здрібнена стружка з низьковуглецевої сталі.

В результаті експериментів були проведені дослідження виготовлення смуг товщиною 2 – 4 мм, зі швидкістю розливання 50 – 70 м/хв, час затвердіння рідкої сталі було зафіксовано 0,8 – 1,0 с.

Результати експериментів занесені в таблицю 1, де порівнюються час кристалізації рідкої сталі, швидкість охолодження та коефіцієнт витрати металу при безперервній валковій розливці сталі для виготовлення штаби без використання суспензії і з використанням.

Таблиця 1

Результати дослідження збільшення ефективності швидкості і часу кристалізації металу при валковій розливці

h, мм	Без суспензії			З суспензією			Ефективність		
	v, °C/с	t _{кр} , с	k _{вит}	v _с , °C/с	t _{крс} , с	k _{витс}	v%	t%	k _{вит} %
2	950	1,0	1,05	1300	0,8	1,02	26,9	20,0	2,9
2,5	920	1,1	1,04	1280	0,9	1,015	28,1	18,1	2,5
3	900	1,2	1,03	1230	0,95	1,01	26,8	20,8	1,94
4	880	1,25	1,02	1200	1,0	1,008	26,6	20,0	1,96

Позначення в таблиці: h – товщина смуги; v – швидкість охолодження без використання суспензії; v_с – швидкість охолодження з використанням суспензії; t_{кр} – час кристалізації без використання суспензії; t_{крс} – час кристалізації з використанням суспензії; k_{вит} – коефіцієнт витрат металу без використання суспензії; k_{витс} – коефіцієнт витрат металу з використанням суспензії.

Результати досліджень показали, що швидкість і час охолодження металу у валках-кристалізаторах залежить від товщини смуги: чим товще смуга – тим повільніше відбувається її охолодження.

Результати експериментів підтвердили ефективність безперервної розливки рідкої сталі у валки-кристалізатори, які мають буртики для утримання здрібненої металевої стружки, що дозволяє збільшити швидкість кристалізації, час охолодження рідкого металу, забезпечити відсутність витікання сталі між валковий простір, що забезпечує збільшення випуску готової продукції, зменшує коефіцієнт витрати металу, збільшує продуктивність процесу виготовлення смуги.

Висновки та напрямок подальших досліджень результати експериментів дозволили дослідити ефективність використання суспензійного розлиття рідкої сталі при безперервній валковій розливці у ливарно-прокатні кліті для виготовлення тонких смуг

Визначено швидкість охолодження та час кристалізації металу і коефіцієнт витрати металу за новою технологією з використанням пропонуемого обладнання, що забезпечує збільшення швидкості кристалізації на 26 – 28 %, скорочення тривалості кристалізації рідкої сталі на 18-20% , зменшення коефіцієнту витрат металу приблизно на 2 % в валках-кристалізаторах в умовах безперервної суспензійної розливки сталі. В подальшому потрібно провести дослідження в промислових умовах.

Список літератури

1. **Губін Г.В.** Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза/ **Г.В.Губін, В.О. Півень.** – Кривий Ріг: ПП «Видавничий дім», 2010. – 366 с.
2. **Губін Г.В.** Про переробку відпрацьованих автомобілей / **Г.В. Губін, Ю.П. Калініченко, В.В.Ткач, Г.Г.Губін** //Вісник Криворізького технічного університету. Вип. 31, 2012. – с. 3 – 8.
3. **Данченко В. Н.** Прогрессивные процессы обработки металлов давлением [Текст] / **В. Н. Данченко** // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2011. – № 7. – С. 1-8.
4. **Минаев А. А.** Возрождение металлургии на Украине невозможно без приоритетного развития прокатного производства [Текст] / **А. А. Минаев, Ю. В. Коновалов** // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2011. – № 7. – С. 143-144.
5. **Alzetta F. Luna** The Danicli ECR Endless Casting Rolling Plant for Specialty Steels-Technology, Innovation and Benefits // *Iron and Steelmaker*, 2002. - № 7 – P. 41-49
6. **Данченко В.М.** Теорія процесів обробки металів тиском: Підручник/ **Данченко В.М., Гринкевич В.О., Головка О.М.** – Дніпропетровськ: Пороги, 2008. – 370 с.
7. **Минаев А. А.** Совмещенные металлургические процессы [Текст]: монография / **А. А. Минаев.** – Донецк: Технопарк Дон ГТУ УНИТЕХ, 2008. – 522 с.
8. **Nuernberger F.** Microstructure transformations in tempering steels during continuous cooling from hot forging temperatures / **F. Nuernberger, O. Grydin, M. Schaper, F.-W. Bach, B. Koczurkiewicz, A. Milenin** // *Steel research int.* – Aachen: Verlag Stahleisen GmbH, 2010. – №3(81). – P. 224–233
9. **Grydin O.** Mathematische Modellierung des Gießens von dünnen Blechen nach dem Zwei-Rollen-Verfahren / **O. Grydin, E. Batyrshina, Fr.-W. Bach** // *Proceeding of ANSYS Conference, 27th CADFEM Users' Meeting.* – Leipzig, 2009. – 2.11.15. – P. 1–9.
10. **Danchenko V.M.** Mathematical modeling of the twin-roll casting process / **V.M. Danchenko, O.Yu. Grydin, Yu.Yu. Kalashnikov** // *Proceedings of International Conference "Advances in Metallurgical Processes and Materials".* – Dnipropetrovsk, 2007. – Vol.2. – P. 256–259.
11. **Tekkaya A.E.** Zeiteffiziente Prozesskettenmodellierung und –berechnung in der Blechumformung und-verarbeitung / **A.E. Tekkaya, A. Brosius, T. Cwiekala, Fr.-W. Bach, O. Grydin, M. Schaper, B. Svendsen, C. Barthel** // *Tagungsband zur MEFORM 2008. Simulation von Umformprozessen.* – Freiberg: Technische Universität „Bergakademie Freiberg“, 2008. – S. 262–274.
12. **Затуловський С. С.** Суспензійна розливка [Текст] / **С. С. Затуловський.** – К: Наукова думка, 1981. – 260 с.
13. Ретроспективний аналіз масива опублікованих патентів, характеризуючі розвиток литейно-прокатних модулів за період 2000-2013 г.г. в Україні і Росії [**Н.Н.Бережній, М.М., Чубенко В.А., А.А.Хіноцька, С.О.Мацішин, А.А.Шепель, В.А.Чубенко**] // *Технологічний аудит і резерви виробництва.* – 2015, №1/1 (21)/ - С. 4-7.
14. Патент України № 100153 МПК В21В1 Ливарно-прокатна кліть / **М.М.Бережній, В.А. Чубенко, А.А.Хіноцька, С.О.Мацішин, А.О.Шепель, В.А.Чубенко,** ДВНЗ «Криворізький національний університет». – заявл. 05.02.2015, опубл. 10.07.2015, Бюл.№ 13.
15. The increase in efficiency of strips production process in foundry and rolling mill stand/ **Nikolay Berezhnoy, Viktoriya Chubenko, Alla Khinotskaya, Valeriy Chubenko** // *Metallurgical and Mining Industry.* – 2015, № 12. – P. 296 – 300.

Рукопис подано до редакції 11.04.16