

ПРОЦЕСИ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 31, 2023, № 2 (333), 34-41

<https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.034>

УДК 669.18

О.М. Смірнов¹, д-р техн. наук, проф., зав. відділу, e-mail: stalevoz@i.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>, Web of Science ResearcherID: N-1890-2017

В.Є. Ухін², канд. техн. наук., інженер з патентно-винахідницької роботи, e-mail: ukhinvladimir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3560-4130>, Web of Science ResearcherID: P-9805-2015

С.В. Семірягін³, канд. техн. наук, доц., заст. ген. директора, e-mail: td.destal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8733-3216>

А.Ю. Семенко¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: semenko.au@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>, Web of Science ResearcherID: GYD-3600-2022

В.В. Осипенко³, ген. директор, e-mail: g.d.destal@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0001-9934-7615>

Ю.О. Смірнов¹, канд. екон. наук, доц., ст. наук. співр., e-mail: smirnoff.yuriy@gmail.com

Ю.П. Скоробагатько¹, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: yulka.ukr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1724-9895>

Д.В. Рябий⁴, заст. генерального директора, e-mail: ryaboiy@gmail.com

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

²ТОВ «ШЕФФІЛД РЕФРАКТОРІС УКРАЇНА» (Дніпро, Україна)

³ТОВ НВП «Дніпроенергосталь» (Запоріжжя, Україна)

⁴ТОВ «ГІР-ІНЖІНІРІНГ» (Дніпро, Україна)

Деякі особливості розливання сортової заготовки відкритим та закритим струменем

Проведено експериментальні серії розливання сталі для визначення впливу методу безперервного розливання на частоту формування дефектів сортової заготовки. При цьому виробництво квадратних заготовок перетином 125x125 мм здійснювалось на шестиструмковій сортовій машині безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) зі швидкостями розливання 2,8-4,3 м/хв. У процесі дослідження спочатку була розлита серія з 5 плавов сталі 60 (Ст60) відкритим струменем. Після цього, з використанням тих же гільз кристалізаторів, послідовно розливали закритим струменем 5 плавов сталі 40Х. Шляхом промислового експерименту було визначено, що в результаті безперервного розливання сталі відкритим струменем кількість ромбічності сортової заготовки становить 4,5 %. Зокрема, у випадку застосування технології розливання металу закритим струменем дефектів геометричної форми заготовок не виявлено. Використання системи «стопор-моноблок» — «стакан-дозатор» — «занурений стакан» дозволяє більш точно й вчасно регулювати витрату металу під час розливання в автоматичному режимі, не змінюючи швидкість витягування заготовки. При цьому забезпечується збереження рівня металевого розплаву в кристалізаторі, що найбільш точно враховує особливості формування скоринки заготовки по всій довжині гільзи при поточній швидкості лиття. Відсутність необхідності регулювання швидкості розливання рівнем металу в промківші дозволяє підтримувати в ньому оптимальну кількість розплаву, що стабілізує температуру розливання. Підведення струменя сталі за допомогою зануреного стакана під рівень металу в кристалізаторі запобігає бурлінню на межі розподілу фаз, а можливість істотного збільшення внутрішнього діаметра стакана-дозатора (у порівнянні з вільним витіканням) у кілька разів знижує швидкість його заростання відкладеннями корунду. Крім цього, розливання закритим струменем дозволяє застосовувати спеціальні шлакоутворюючі суміші, які забезпечують покращення якості поверхні заготовки. Додатково підвищити якість безперервнолитих зливків можливо за рахунок застосування електромагнітного перемішування рідкої сталі.

Ключові слова: безперервне розливання, дефекти безперервнолитої сортової заготовки, вторинне окиснення, відкритий струмінь, стопор-моноблок, занурений стакан, електромагнітне перемішування.

Розвиток ринкових відносин у сфері виробництва і реалізації металопродукції характеризується випереджаючим ростом вимог до підвищення якості сталі при одночасному зниженні її собівартості вже на стадії одержання безперервнолитої заготовки. У цьому зв'язку раціональна технологія безперервного розливання сталі представляється досить важливим складовим елементом, що визначає техніко-економічні показники роботи цеху і собівартості металопродукції.

Найбільш широке промислове впровадження у світі для сортових машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) одержала технологія розливання сталі відкритим струменем (рис. 1) через стакан-дозатор строго регламентованого діаметра [1]. Відкритим струменем зазвичай розливають сталі звичайної якості, що не зазнають строгого контролю макроструктури при подальшій прокатці та призначені для одержання металопродукції у вигляді періодичного профілю, кутиків, двотаврів, дроту, арматури та ін. Найбільше поширення така схема розливання одержала в умовах міні-металургійних заводів [2]. Основним стратегічним завданням розливання сталі відкритим струменем на сортових МБЛЗ є мінімізація виробничих витрат, яка найбільшою мірою може бути реалізована при розливанні довгими та наддовгими серіями з одного проміжного ковша [3]. На сьогоднішній день тривалість серії розливання на сучасних сортових МБЛЗ досягає 70-100 ківшів і більше. При цьому вкрай важливим технологічним показником є забезпечення серійності розливання безпосередньо з одного промковша, що також сприяє стабільності роботи машини і знижує питомі витрати на вогнетриви та втрати металу, пов'язані з зупинкою МБЛЗ [4-6].

Зокрема, більша продуктивність сортових МБЛЗ досягається за рахунок високої швидкості витягування заготовки (до 5-6 м/хв), яка обумовлена застосуванням багатоступеневих (параболічних)

кристалізаторів, довжина яких становить 1,0-1,1 м. Гільзи кристалізаторів сучасних сортових МБЛЗ є високотехнологічними виробами, які виготовляються з високою розмірною точністю, а на їхню робочу поверхню наноситься спеціальне зносостійке покриття на основі хрому, нікелю та інших металів. Для забезпечення мінімальної деформації профіля гільзи кристалізатора рівень наливу металу повинен становити 100-150 мм від її верхнього торця. Більш високий рівень наливу призводить до переміщення зони максимального розширення, що обумовлює сильне жолоблення гільзи в області кріплення її верхньої частини. При нижчому розташуванні рівня металу відбувається скорочення часу перебування заготовки в кристалізаторі, що потребує корекції режимів розливання.

Однією з основних проблем, що перешкоджають стабільному розливанню сталі на сортових МБЛЗ протягом тривалого часу, є зношування або заростання внутрішньої порожнини стакана-дозатора. Така проблема значною мірою вирішується шляхом застосування пристрою для швидкої заміни стакана-дозатора.

Більш прогресивною, з погляду забезпечення високого рівня якості заготовки, є схема подачі металу з проміжного ковша у кристалізатор за допомогою системи «стопор-моноблок» — «стакан-дозатор» — «занурений стакан». Витрата металу під час розливання регулюється положенням головки стопора відносно стакана-дозатора або дроселюванням шибєрного затвора. Керування положенням стопора здійснюється за допомогою спеціального механізму, який працює в ручному або в автоматичному режимі. При цьому струмінь сталі між промковшем і кристалізатором захищається за допомогою зануреного стакана.

Така схема вимагає спеціальних конструкційних рішень у частині зануреного стакана, які забезпечують вільний простір (20-30 мм) між його зовнішньою

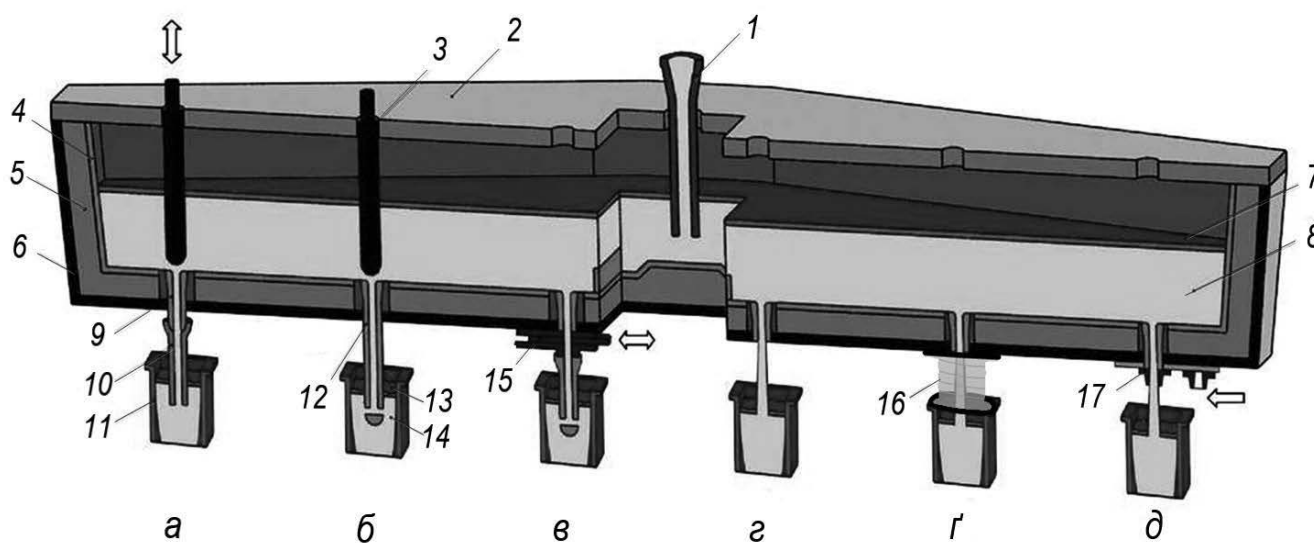


Рис. 1. Схема розливання сталі на сортовій МБЛЗ закритим (а, б, в, г) та відкритим (е, д) струменем: 1 — захисна труба; 2 — кришка промковша; 3 — стопор-моноблок; 4, 5, 6 — робочий, теплоізоляційний і арматурний шар футеровки; 7 — теплоізолююча суміш (ТІС); 8 — рідкий метал у промківші; 9 — стакан-дозатор; 10 — занурений стакан; 11 — кристалізатор; 12 — занурений стакан, сполучений зі стаканом-дозатором; 13 — шлакоутворююча суміш; 14 — рідкий метал у кристалізаторі; 15 — триплитний шибєрний затвор; 16 — сиффон; 17 — пристрій швидкої заміни стакана

поверхнею і стінками кристалізатора. Крім того, використання такого виробу практично виключає можливість розливання довгими серіями в силу неможливості його заміни в результаті зношування. Тому розливання сталі закритим струменем на сортових МБЛЗ застосовується здебільшого у тому випадку, коли мова йде про якісні низьколеговані та леговані сталі [1].

У процесі розливання сортової заготовки необхідно строго дотримуватись сукупності таких нерозривно пов'язаних між собою технологічних параметрів лиття як: швидкість витягування заготовки, профіль гільзи кристалізатора, марка та температура сталі, які враховують особливості формування твердої скоринки в умовах конфігурації використовуваної гільзи.

Незалежно від обраної схеми розливання відхилення від номінальних параметрів лиття може призвести до нерівномірного контакту твердіючої скоринки зі стінкою гільзи кристалізатора. Нерівномірне відведення тепла від заготовки сприяє нерівномірності розподілу температурних полів у твердій скоринці, що спричиняє формування в ній внутрішніх напружень, які є причиною деформації заготовки в поперечному та поздовжньому перетинах. Це призводить до розвитку численних поверхневих і внутрішніх дефектів, які знижують якісні показники і механічні властивості литого металу, а також скорочують термін служби металовиробів з них.

Одним з розповсюджених дефектів безперервної сортової заготовки є викривлення її геометричної форми, так звана «ромбічність», обумовлена різницею діагоналей прямокутника, що становить 5-12 мм і більше (рис. 2). Перевищення термічними напруженнями межі міцності металу в таких заготовках призводить до виникнення поверхневих або внутрішніх тріщин [7, 8].

Поверхневі тріщини у твердій скоринці заготовки виникають, як правило, безпосередньо в кристалізаторі внаслідок дії в ній розтягувальних напруг. При

цьому такі тріщини найбільш характерні для тих кутів твердого каркасу, у яких спостерігається деформація скоринки і її відхід від поверхні гільзи кристалізатора. У той же час у твердій скоринці виявляється можливим розвиток внутрішніх тріщин, які з'являються переважно в тупих кутах з боку фронту твердіння [9]. Разом з тим, розвиток цих тріщин залежить від цілої сукупності технологічних факторів (температури розливання, марки сталі, геометричної форми кристалізатора та якості його поверхні, швидкості витягування заготовки та ін.), що ускладнює формулювання універсальних закономірностей для опису поведінки заготовки в кристалізаторі [10].

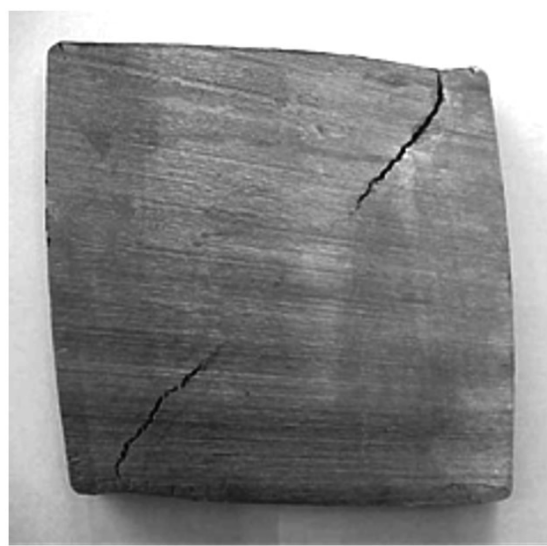
Для оцінки впливу методу безперервного лиття на частоту формування такого поверхневого дефекту сортової заготовки, як ромбічність, на одному з підприємств України були проведені експериментальні серії розливання сталі. При цьому виробництво квадратних заготовок перетином 125x125 мм здійснювалось на шестиструмковій сортовій МБЛЗ зі швидкостями розливання 2,8-4,3 м/хв. У процесі дослідження спочатку була розлита серія з 5 плавів сталі 60 (Ст60) відкритим струменем. Після цього, з використанням тих же гільз кристалізаторів, послідовно розливали серію з 5 плавів сталі 40Х закритим струменем. Технологічні параметри експериментальних плавів представлені в таблиці.

У результаті промислового експерименту було встановлено, що під час безперервного розливання сталі відкритим струменем кількість ромбічної сортової заготовки дорівнювало 4,5 %. При цьому у випадку застосування технології розливання металу закритим струменем дефектів геометричної форми заготовок не спостерігалось.

Причиною істотної різниці в кількості дефектних заготовок, отриманих відповідно до описаних вище технологій, полягає в принципово різних схемах дозування металу при його витіканні з промковша в кристалізатор. У процесі безперервного розливання



а



б

Рис. 2. Характерне розташування діагональних тріщин на поперечних темплетях (квадрат 125 мм) сортової заготовки: а — ромбічність 18 мм; б — ромбічність 20 мм

Технологічні параметри експериментальних серій розливання сталі в сортові заготовки перетином 125x125 мм

Метод безперервного розливання	Відкритий струмінь	Закритий струмінь
Марка сталі	Ст60	40Х
Кількість плавів у серії, шт.	5	5
Швидкість розливання, м/хв	2,8-4,3	2,8-3,2
Перегрів металу над температурою ліквідус у промківші, °С	14-40	25-37
Витрата води на охолодження кристалізатора, л/хв	1600-1750	1700
Різниця температури води на вході та виході з кристалізатора, °С	7,8-9,2	6,8-8,2
Витрата води на вторинне охолодження:		
Зона 1, л/хв	140-190	60-170
Зона 2, л/хв	180-240	190-220
Зона 3, л/хв	130-170	140-160
Питома витрата води в зоні вторинного охолодження, л/кг	1,4	1,4

сталі відкритим струменем регулювання швидкості розливання здійснюється шляхом задання певної висоти наливу металу в промківші та внутрішнього діаметра стакана-дозатора. При цьому підтримка рівня металу в кристалізаторі здійснюється за допомогою варіювання швидкості витягування заготовки. Зміна кількості розплаву в проміжному ківші, з метою регулювання швидкості лиття, провокує більші відхилення температури перегріву металу від номінальних значень у процесі розливання (як показано в таблиці), що у свою чергу надалі погіршує умови твердіння заготовки.

При постійному феростатичному напорі та однаковій питомій витраті сталі струмінь металу, що вільно витікає зі стакана-дозатора, має суцільну ділянку, довжина якої достатня для досягнення нею дзеркала металу в кристалізаторі. У випадку повільної зміни (збільшення) діаметра стакана-дозатора, внаслідок його зношування, регулювання рівня металу в кристалізаторі здійснюється збільшенням швидкості витягування заготовки. Ще однією причиною виходу стакана-дозатора з ладу є заростання його внутрішньої порожнини внаслідок осідання на поверхні цирконової вставки продуктів розкислення сталі алюмінієм. Будь-яка нерівномірність зміни діаметра стакана-дозатора може викликати відхилення точки падіння струменя металу від центру заготовки, що порушить симетрію наростання твердої скоринки за периметром кристалізатора.

У той же час застосування такого інерційного механізму, як тягнуче-правильна кліть, у якості засобу зміни та контролю швидкісних параметрів розливання може призвести до коливання рівня сталі в кристалізаторі, що стане причиною формування дефектів у заготовці або навіть до прориву скоринки металу. Використання системи «стопор-моноблок» — «стакан-дозатор» — «занурений стакан» (рис. 3) дозволяє більш точно та вчасно регулювати витрату металу під

час розливання в автоматичному режимі, не змінюючи швидкість витягування заготовки.

При використанні вищенаведеної системи стає можливим забезпечення постійного положення рівня розплаву в кристалізаторі, яке найбільш точно враховує особливості формування скоринки заготовки по всій довжині гільзи при поточній швидкості лиття. Відсутність необхідності регулювання швидкості розливання рівнем металу в промківші дозволяє підтримувати в ньому оптимальну кількість розплаву, що стабілізує температуру розливання. Підведення

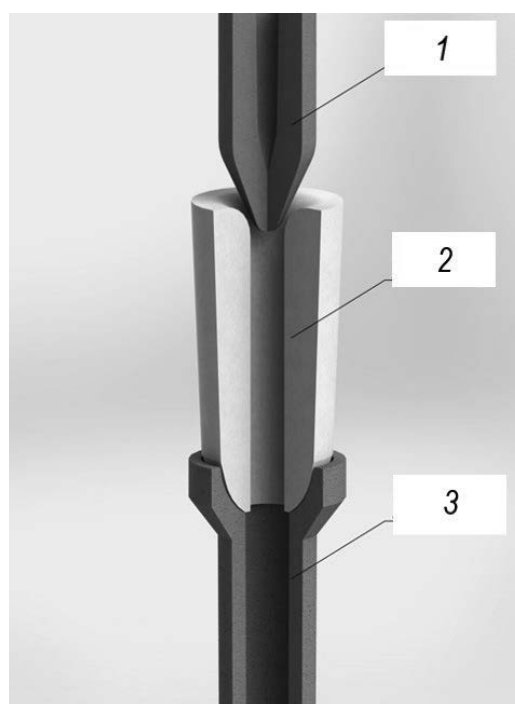


Рис. 3. Схема подачі металу з промковша в кристалізатор за допомогою системи «стопор-моноблок» (1) — «стакан-дозатор» (2) — «занурений стакан» (3)

струменя сталі за допомогою зануреного стакана під рівень металу в кристалізаторі дає можливість істотно збільшити внутрішній діаметр стакана-дозатора (у порівнянні з вільним витіканням), що у кілька разів знижує швидкість його заростання відкладеннями корунду. Крім цього, розливання закритим струменем дозволяє застосовувати спеціальні шлакоутворювальні суміші, які забезпечують підвищення якості поверхні заготовки.

Додатковим методом підвищення якості безперервнолитої сортової заготовки є електромагнітне перемішування (ЕМП) рідкої сталі [11, 12]. Механізм електромагнітного впливу є результатом складної взаємодії електродинамічних, магнітогідродинамічних і металургійних факторів. Індуктивна система ЕМП являє собою статор асинхронного двигуна (рис. 4), ротором якого є рідка лунка безперервнолитого зливка. Застосування ЕМП дозволяє покращити якість підповерхневої і осьової зони безперервнолитих заготовок, оскільки воно впливає на формування кристалічної структури, переміщення неметалевих включень, хімічну сегрегацію та розподіл газів. На практиці використовуються статори з обертовими і лінійними полями. Основні електричні параметри пристроїв ЕМП міняються в широкому діапазоні залежно від їхньої конструкції та перетину заготовки. Характер потоків, що створюються шляхом ЕМП, залежить від конкретних умов (перетину заготовки, місця застосування впливу, вимог до результатів впливу та ін.). Магнітодинамічні потоки, які створюються шляхом ЕМП, складаються з одного або декількох замкнених контурів.

Основний ефект ЕМП у кристалізаторі пов'язаний зі зміною гідродинамічного стану в рідкій ванні кристалізатора під впливом примусових конвективних потоків. Відомо, що картина перемішування металу в кристалізаторі здебільшого визначається інтенсивністю та характером поведінки падаючого з проміжного ковша струменя. При цьому падіння струменя

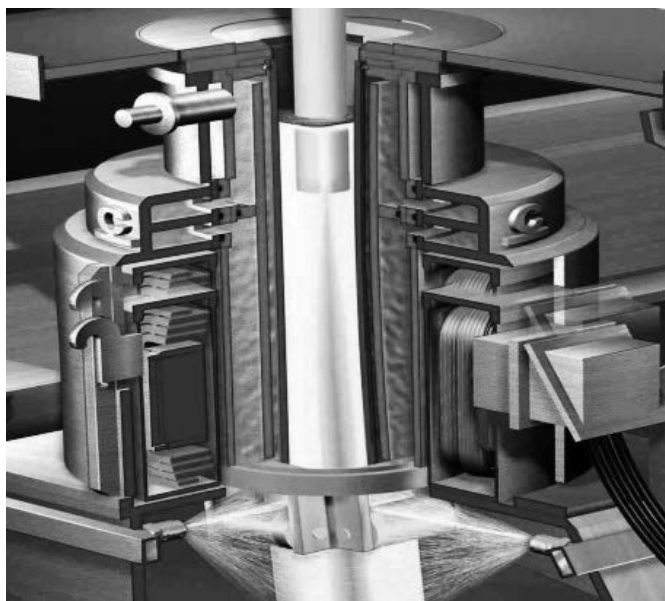


Рис. 4. Схема кристалізатора сортової МБЛЗ із пристроями для ЕМП

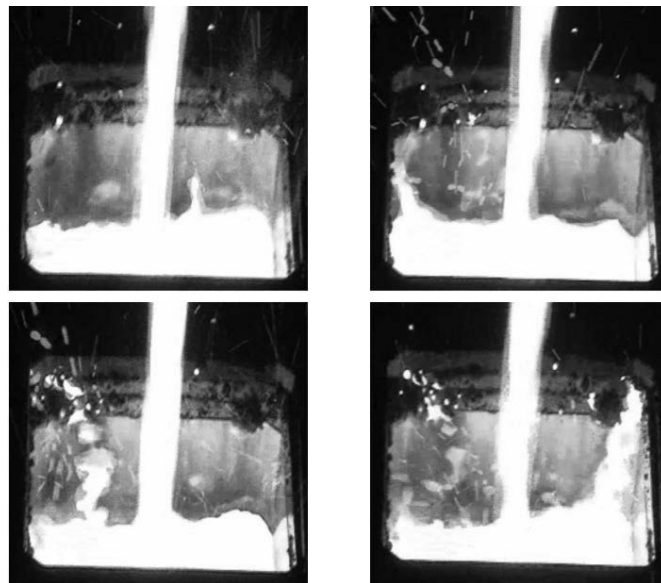


Рис. 5. Бурління металевого розплаву в кристалізаторі, спричинене падаючим струменем

в кристалізатор супроводжується перемішуванням (бурлінням) металу біля поверхні та у самому кристалізаторі (рис. 5), що погіршує роботу змащення, сприяє затягуванню в метал пухирців газу та шлакових включень, ускладнює роботу пристрою для автоматичного контролю рівня металу та ін. На наш погляд, найбільш сильний вплив ефекту падіння струменя в рідкометалеву ванну кристалізатора спостерігається при розливанні сортових заготовок на високошвидкісних МБЛЗ.

Перераховані вище явища можливо нівелювати застосуванням пристроїв ЕМП, які забезпечують формування висхідних потоків уздовж фронту твердіння або обертання сталі в горизонтальній площині кристалізатора.

Обертове магнітне поле в кристалізаторі під час лиття сортових заготовок відкритим струменем створює глибокий меніск металу, на дні якого зосереджують неметалеві включення, що обертаються з меншою швидкістю, ніж рідка сталь. У результаті цього ефекту концентрація неметалевих включень у твердій оболонці зливка суттєво знижується.

У випадку використання електромагнітного перемішування при розливанні сталі закритим струменем необхідно враховувати вплив примусово впорядкованих потоків металу на стійкість вогнетривів. Виконані дослідження з використанням 8 занурених стаканів показали, що характер їх зношування при застосуванні ЕМП у кристалізаторі має виражені особливості (початкова товщина стінки становила 17,5 мм). По-перше, у занурених стаканах зменшується товщина шару відкладень на 15-25 % (залежно від марки сталі та режимів ЕМП). По-друге, у нижній частині зануреного стакана спостерігається стійке ерозійне зношення стінки із зовнішньої її сторони. Зафіксована також втрата товщини стінки на рівні 10-15 % при серійності 4 плавки. На рис. 6 наведено фотографію поздовжнього перетину нижньої частини зануреного стакана з використанням ЕМП (а) і без ЕМП (б) (після розливання серії із двох плавки).

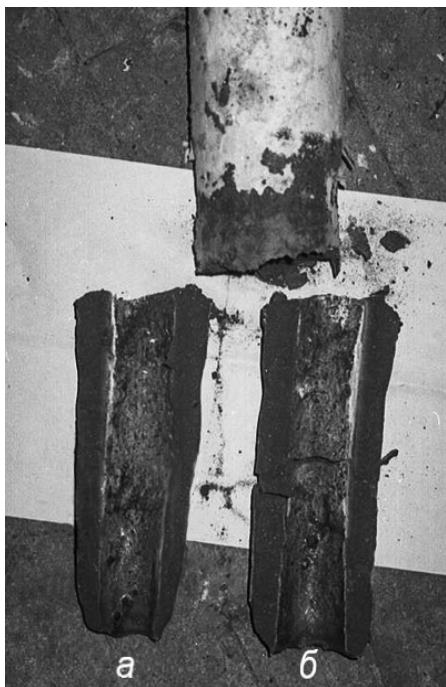
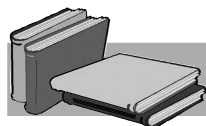


Рис. 6. Фото поздовжнього перетину нижньої частини зануреного стакана при розливанні з використанням ЕМП (а) і без ЕМП (б)

У цілому наведені зразки досить близькі за конфігурацією профіля. Особливо важливим представляється підвищене зношування в торцевій частині зануреного стакана (область витікання струменя в кристалізатор). При цьому при використанні ЕМП у кристалізаторі серійність розливання знижується в середньому на 20-25 %.

Висновки

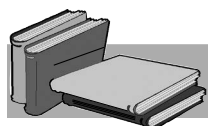
В результаті виконаних досліджень встановлено, що схема подачі металу з проміжного ковша в кристалізатор за допомогою системи «стопор-моноблок» — «стакан-дозатор» — «занурений стакан» дозволяє підвищити якість сортової заготовки, у порівнянні з розливанням сталі відкритим струменем за рахунок забезпечення більш стабільних і точних параметрів лиття. Додатково підвищити якість безперервнолитих зливків можливо за рахунок застосування пристроїв для електромагнітного перемішування рідкої сталі.



ЛІТЕРАТУРА

1. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Подкорытов А.Л., Ухин В.Е., Кравченко А.В., Оробцев А.Ю. Непрерывная разливка сортовой заготовки: Монография. Алчевск: ДонГТУ, 2012. 449 с.
2. Смірнов О.М., Верзілов О.П., Смірнов Ю.О. Металургійні міні-заводи: конкурентоспроможність та перспективи розвитку. *Метал та лиття України*. 2020. Том 28. № 2 (321). С. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.02.034>
3. Bolender T., Fandrich R., Jungblut H.-A., Kemper G., Müller R., Narzt H.P., Ney G., Schnitzer H.: 'Zum Entwicklungsstand der Stranggießtechnologie — State of the art in continuous casting technology'. *Stahl u. Eisen*. 2009. 129, (7), 22–39.
4. Pindor J., Michalek K. Application of tundish metallurgy for improvement of steel quality and increasing of continuous casting operational parameters. *Proceedings of 3-rd European Conference on Continuous Casting*, 1998. P. 1025-1028.
5. Смирнов А.Н., Ларионов А.А., Матвеев С.П. Энергосберегающий ресурс непрерывной разливки в условиях современного конвертерного цеха. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2003. № 3. С. 21-24.
6. Min B.-J., Shin G., Lee S.-H. Development of the high-speed, thin-slab casting technology of POSCO. *Iron and Steel Technology*. 2013. 10. (7). P. 76-84.
7. Смирнов А.Н., Ухин В.Е., Жибоедов Е.Ю. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокопроизводительной МНЛЗ. *Процессы лития*. 2009. № 1. С. 33-42.
8. Смірнов О.М., Ухин В.Е., Верзілов О.П., Семенко А.Ю., Гойда Д.І., Куліш Ю.Ю. Вивчення процесів формування підповерхневих тріщин у ромбічній сортовій заготовці при виробництві в умовах металургійного мікро-заводу. *Метал та лиття України*. 2020. Том 28. № 3 (322). С. 40-46. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.03.040>
9. Sertucha J., Lacaze J. Casting Defects in Sand-Mold Cast Irons — An Illustrated Review with Emphasis on Spheroidal Graphite Cast Irons. *Metals*. 2022. № 12 (3). 504. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12030504>
10. Смирнов А.Н., Ухин В.Е. Особенности деформации твердой корочки заготовки в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ. *Электрометаллургия*. 2009. № 6. С. 14-20.
11. Смирнов А.Н., Ухин В.Е., Верзілов А.П. Исследование особенностей формирования кристаллической структуры непрерывнолитой заготовки при принудительном перемешивании ее жидкой сердцевины. *Металл и литье Украины*. 2019. № 5-6 (312-313). С. 21-27.
12. Dubodelov, V., Semenko, A., Bogdan, K., Goryuk, M. Development of principles to control the processes of continuous casting of alloys using magnetodynamic equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4. No. 1 (100). P. 69-75. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.172051>

Надійшла 14.04.2023



REFERENCES

1. Smirnov, A.N., Kubersky, S.V., Podkorytov, A.L., Ukhin, V.E., Kravchenko, A.V., Orobtssev, A.Yu. (2012). Continuous casting of billet: Monograph. Alchevsk: DonSTU, 449 p. [in Russian].
2. Smirnov, O.M., Verzilov, O.P., Smirnov, Yu.O. (2020). Metallurgical mini-mills: competitiveness and prospects. *Metal and Casting of Ukraine*, vol. 28, no. 2 (321), pp. 34-40, doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.02.034> [in Ukrainian].
3. Bolender, T., Fandrich, R., Jungblut, H.-A., Kemper, G., Müller, R., Narzt, H.P., Ney, G., Schnitzer, H. (2009): 'Zum Entwicklungsstand der Stranggießtechnologie — State of the art in continuous casting technology'. *Stahl u. Eisen*, 129, (7), 22-39.
4. Pindor, J., Michalek, K. (1998). Application of tundish metallurgy for improvement of steel quality and increasing of continuous casting operational parameters. Proceedings of 3-rd European Conference on Continuous Casting, pp. 1025-1028.
5. Smirnov, A.N., Larionov, A.A., Matveenkova, S.P. (2003). The energy-saving resource for continuous casting in a modern converter plant. *Metallurgical and mining industry*, no. 3, pp. 21-24 [in Russian].
6. Min, B.-J., Shin, G., Lee, S.-H. (2013). Development of the high-speed, thin-slab casting technology of POSCO. *Iron and Steel Technology*, 10, (7), pp. 76-84.
7. Smirnov, A.N., Ukhin, V.E., Zhiboedov, E.Yu. (2009). Physical modeling of the conditions for the formation of a continuously cast billet in the mold of a high-performance CCM. *Casting processes*, no. 1, pp. 33-42 [in Russian].
8. Smirnov, O.M., Ukhin, V.E., Verzilov, O.P., Semenko, A.Yu., Hoyda, D.I., Kulish, Yu.Yu. (2020). Study of the processes of subsurface crack formation in a rhombic varietal billet during production in the conditions of a metallurgical micro-mill. *Metal and Casting of Ukraine*, vol. 28, no. 3 (322), pp. 40-46, doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2020.03.040> [in Ukrainian].
9. Sertucha, J., Lacaze, J. (2022). Casting Defects in Sand-Mold Cast Irons — An Illustrated Review with Emphasis on Spheroidal Graphite Cast Irons. *Metals*, no. 12 (3). 504, doi: <https://doi.org/10.3390/met12030504>
10. Smirnov, A.N., Ukhin, V.E. (2009). Peculiarities of the deformation of the hard shell of the billet in the mold of the billet caster. *Electrometallurgy*, no. 6, pp. 14-20 [in Russian].
11. Smirnov, A.N., Ukhin, V.E., Verzilov, A.P. (2019). Investigation of billet crystal structure formation features during forced stirring of its liquid core. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 5-6 (312-313), pp. 21-27 [in Russian].
12. Dubodelov, V., Semenko, A., Bogdan, K., Goryuk, M. (2019). Development of principles to control the processes of continuous casting of alloys using magnetodynamic equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 1 (100), pp. 69-75, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.172051>

Received 14.04.2023

Summary

O.M. Smirnov¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department, e-mail: stalevoz@i.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>, Web of Science ResearcherID: N-1890-2017

V.Ye. Ukhin², PhD (Engin.), Patent and Invention Work Engineer, e-mail: ukhinvladimir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3560-4130>, Web of Science ResearcherID: P-9805-2015

S.V. Semiriagin³, PhD (Engin.), Associate Professor, Deputy CEO, e-mail: td.destal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8733-3216>

A.Yu. Semenko¹, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: semenko.au@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>, Web of Science ResearcherID: GYD-3600-2022

V.V. Osypenko³, CEO LTD, e-mail: g.d.destal@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0001-9934-7615>

Yu.O. Smirnov¹, PhD (Econom.), Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: smirnoff.yuriy@gmail.com

Yu.P. Skorobagatko¹, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: yulka.ukr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1724-9895>

D.V. Ryabiy⁴, Deputy General Director, e-mail: ryaboiiy@gmail.com

¹*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

²*Sheffield Refractories Ukraine, LLC (Dnipro, Ukraine)*

³*LTD Scientific and Manufacturing Enterprise Dneproenergostal (Zaporizhzhia, Ukraine)*

⁴*"GIR-ENGINEERING", LLC (Dnipro, Ukraine)*

Some specifics of the billet open and submerged stream casting

Experimental series of steel casting were carried out to determine the effect of the continuous casting method on the frequency of defects formation in billets. At the same time, the 125x125 mm square billets production was carried out on a six-strand caster with casting speeds of 2.8-4.3 m/min. In the process of research, a series of 5 melts of steel 60 (St60) was initially casted with an open stream. After that, using the same molds, 5 melts of steel 40X were sequentially casted with a submerged stream. As a result of an industrial experiment, it was found that because of the open stream continuous casting the number of rhomboidal billets was 4.5 %. In the case of using the submerged stream technology defects in the billet shape were not observed. The use of the "stopper rod" — "tundish nozzle" — "submerged entry nozzle" system allows to control metal consumption during casting more accurate and timelier in automatic mode without changing the billet casting speed. At the same time, the position of the metal level in the mold is constantly ensured, which most accurately considers the features of the billet solid shell formation over the entire mold length at the current casting speed. The absence of the need to control the casting speed by the level of metal in the tundish makes it possible to maintain the optimal amount of melt in it, which stabilizes the casting temperature. The submerged casting prevents bubbling at the phase boundary in the mold and provides the possibility of a significant increase in the nozzle inner diameter (compared to the open stream) that reduces the rate of its clogging with corundum deposits several times. In addition, submerged casting allows the use of special mold powders, which improve the surface quality of the billets. It is possible to additionally improve billets quality using electromagnetic stirring of liquid steel during continuous casting.

Keywords

Continuous casting, defects in continuously casted billets, reoxidation, open stream, stopper rod, submerged entry nozzle, electromagnetic stirring.