

УДК 621.746.27:537.812**О. П. Верзілов**, канд. техн. наук, старш. наук. співроб;e-mail: verzilovalex@gmail.com; ORCID 0000-0003-0463-5006

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

ВІДПРАЦЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕМІШУВАЧА В КРИСТАЛІЗАТОРІ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ РОЗЛИВАННІ КВАДРАТНИХ ЗАГОТОВОК В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

Електромагнітне перемішування в кристалізаторі МБЛЗ є одним з найбільш ефективних методів фізичного впливу на рідкий метал з метою формування якісної поверхні і внутрішньої структури безперервнолитого злитка. Це пов'язано з тим, що первинна кірка заготовки, що твердне, має незначну товщину і її термічний опір теплопередачі до стінки кристалізатора мінімально. Відпрацювання оптимальних режимів електромагнітного перемішування в кристалізаторі при безперервному розливанні виконували для квадратних заготовок 120, 150, 180 мм з точки зору поліпшення їх макроструктури. Принцип дії ЕМП заснований на принципі роботи асинхронного трифазного двигуна, тобто біжить магнітне поле ЕМП взаємодіє з вихровими струмами, наведеними в рідкому металі, і призводить останній в рух в напрямку переміщення магнітного поля. Перемішувач фірми Danieli Rotelec закріплений на опорі, що є частиною незалежного від кристалізатора столу гойдання. ЕМП розташовується навколо корпусу кристалізатора у верхній або нижній позиціях. ЕМП живиться від низькочастотного джерела живлення для збільшення глибини проникнення магнітного поля в рідку фазу кристалізується злитка. Апробовано застосування системи електромагнітного перемішування сталі в кристалізаторі (М-ЕМС) з параметрами: сила струму 280–380 А, частота струму 6 Гц, для поліпшення якості поверхні і внутрішньої структури заготовок. Також виконано розливання серій плавів з 1–2-х разовою зміною по ходу серії положення проміжного ковша з зануреними стаканами (за рахунок періодичного опускання на 30 мм) по висоті зони контакту зі шлаковим поясом і зони роботи ЕМП для забезпечення стійкості занурених стаканів і серійності розливання 4–6 плавів. У процесі відпрацювання освоєно розливання 28 марок сталі, всього відлито 84625,0 т сортової заготовки, в тому числі 26462,09 т (31,27 %) вакуумована сталь марок 25Г2, 35Г2Ф, 36Г2С, 37Г2С, 5ЛХ42. Вихід придатного металу склав в середньому 96,86 %.

Ключові слова: металургійний мікро-завод, електромагнітний перемішувач, кристалізатор, безперервне розливання, сортова заготовка.

Безперервне розливання сталі використовується на більшості металургійних мікро-заводах та висуваються підвищені вимоги до якості безперервнолитих заготовок. Особливе місце займають проблеми підвищення їх фізичної та хімічної однорідності, які можна вирішити шляхом інтенсифікації тепло- і масообмінних процесів при формуванні злитка на машині безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Поліпшення якості заготовки можна досягти застосуванням зовнішніх впливів на твердіючий метал, зокрема, при впливі біжить магнітне поле на рідку фазу злитка [1–5]. Електромагнітне перемішування може здійснюватися на різних ділянках заготовки під час її формування на МБЛЗ, тобто в кристалізаторі, в зоні вторинного охолодження і в нижній частині рідкої лунки [6]. Електромагнітне перемішування в кристалізаторі МБЛЗ є одним з найбільш ефективних методів фізичного впливу на рідкий метал з метою формування якісної поверхні і внутрішньої структури безперервнолитого злитка. Це пов'язано з тим, що первинна кірка заготовки, що затвердіває, має незначну товщину і її термічний опір теплопередачі до стінки кристалізатора мінімальне. При цьому створення примусового перемішування сприяє переміщенню більш гарячого металу до фронту затвердіння, тобто інтенсифікуються тепло- і масообмінні процеси на даній ділянці.

Кристалізація та структуроутворення сплавів

Відпрацювання оптимальних режимів електромагнітного перемішувача (ЕМП) в кристалізаторі при безперервному розливанні квадратних заготовок 120, 150, 180 мм проводили в промислових умовах Донецького електро-металургійного заводу. Виплавку сталі проводили в ДСП-2 «Данарк» ємністю 120 т. Після обробки плавов на установці «під-ківш» масова частка сірки і фосфору в металі становила: $S \leq 0,010 \%$ (0,004–0,009 %), $P \leq 0,015 \%$ (0,008–0,014 %). Розливання сталі здійснювали на шестиструмковій МБЛЗ фірми Danieli, призначеної для отримання заготовок квадратного і круглого перетинів з вуглецевих, низьколегованих, кременистих і підшипникових сталей. Основні технічні параметри МБЛЗ і кристалізатори наведено в табл. 1 відповідно.

Таблиця 1
Технічні параметри МБЛЗ

№ п/п	Параметр	Величина
1	Ємність сталерозливного ковша, т	120
2	Радіус базової поверхні, мм	7000
3	Радіус розгину, мм	15000
4	Кількість струменів, шт	6
5	Тип розливання	закритий струмень
6	Ємність проміжного ковша, т	22
7	Рівень металу в проміжному ковші, мм	800
8	Вторинне охолодження	Чотири незалежних контури охолодження
9	Швидкість розливання, м/хв	2...5,5

Розливання сталі з проміжного ковша здійснювали через стакан-дозатор Ø34 мм з зануреним прямоточним стаканом під рівень металу в кристалізаторі. Тип кристалізатора: мідний гільзовий, криволінійний, багатоконусний, довжиною 1000 мм для квадратної сортової заготовки. Радіус вигину 9 метрів.

Для поліпшення якості поверхні і внутрішньої структури металу, збільшення зони рівновісних кристалів в нижній частині корпусу гільзового кристалізатору МБЛЗ встановлений ЕМП. В табл. 2 надано електромагнітні і конструктивні параметри ЕМП.

Таблиця 2
Електромагнітні та конструктивні параметри ЕМП

Номер п/п	Параметр	Величина
1	Число полюсів	2
2	Число фаз	3
3	Струм фази в робочому режимі, А	500
4	Напруга між фазою і нейтраллю при частоті 6 Гц, В	158
5	Частота, Гц	3...6
6	Максимальна повна потужність, кВА	380
7	Розрахункова індукція магнітного поля, Тл	0,04
8	Номінальна витрата води, м ³ /ч	22
9	Діаметр розточування, мм	480
10	Висота, мм	530

Кристалізація та структуроутворення сплавів

Принцип дії ЕМП заснований на принципі роботи асинхронного трифазного двигуна, тобто біжить магнітне поле, ЕМП взаємодіє з вихровими струмами, наведеними в рідкому металі і призводить останній в рух в напрямку переміщення магнітного поля. Перемішувач фірми Danieli Rotelec закріплений на опорі, що є частиною незалежного від кристалізатора столу гойдання. ЕМП розташовується навколо корпусу кристалізатора у верхній або нижній позиціях. ЕМП живиться від низькочастотного джерела живлення для збільшення глибини проникнення магнітного поля в рідку фазу кристалізується злитка.

В якості базового робочого режиму ЕМП в кристалізаторі було обрано частоту на рівні 3 Гц та струм у 300 А. Промислові режими по струму і частоті на одному зі струмків (другому або п'ятому) вибиралися згідно табл. 3, починаючи з другої серії кампанії. Зміну струмового режиму ЕМП на дослідному струмку в ході розливання плавки здійснювали після виливки половини плавки і відбору здавальних проб на інших струмках.

Таблиця 3

Дослідні режими ЕМП при проведенні оціночних плавок

Порядковий №		Дослідний режим ЕМП на одному з струмків	
серії	плавки у серії	Струм, I, А	Частота, ν Гц
2	1	робочий режим	
	2	200, 300	3
	3	400, 500	
	4	робочий режим	
3	1	робочий режим	
	2	200, 300	6
	3	400, 500	
	4	робочий режим	

При освоєнні технології виробництва на МБЛЗ сортових заготовок випробувано і відпрацьовано наступні температурно-швидкісні режими і технологічні параметри, що визначають особливості розливання плавки і якість безперервнолитих заготовок:

- технологічна схема розливання з установкою захисної труби зі спеціальним ущільненням на стакан-колектор шибера сталерозливного ковша до відкриття шибера затвора (1-ша плавка в серії) і мінімальна тривалість розливання відкритим струменем 1–1, 5 хв на перековшовці по серії;

- схема розливання серій плавки: старт на 5–6 струменях (резерв 0–1 струмів) в залежності від розміру заготовки; автоматичний старт струменів з оптимальною масою (рівнем) металу 16–20 т в проміжному ковші для стабільного початку розливання з диференціюванням по струменях.

- температурний режим розливання з перегрівом металу в проміжному ковші над температурою ліквідус 25–40 °С, при забезпеченні оптимального температурного перепаду 3–6 °С в проміжному ковші на плавках з серії за рахунок підтримки максимального рівня сталі в проміжному ковші 800–850 мм (23–24 т) і присадці утеплювальної суміші по 5–10 кг в кожний стопорний отвір кришки проміжного ковша навколо захисної труби на кожній плавці в серії. При цьому в проміжному ковші між дзеркалом металу і кришкою були мінімальні тепловтрати і вторинне окислення, що сприяло стабільному розливанню плавки без затягування струменя в стаканах-дозаторах проміжного ковша і переривання серій плавки.

Кристалізація та структуроутворення сплавів

- швидкість розливання (витягування) заготовок 2–3,6 м/хв залежала від розміру заготовки і температури перегріву сталі в проміжному ковші над температурою ліквідус;
- амплітуда гойдання кристалізатора $a = 7\text{--}11$ мм, частота гойдання до 230 гойд./хв;
- режими вторинного охолодження (ПІД) заготовок – з питомою витратою води 1,15–1,40 л/кг сталі; кількість часток води в ЗВО визначали за маркою сталі і швидкістю розливання за допомогою спеціальних розрахункових алгоритмів з регулюванням по секторах для мінімізації повторного розігріву поверхні заготовки і утворення внутрішніх тріщин;

- застосування системи електромагнітного перемішування (ЕМП) сталі в кристалізаторі (М-EMS) з параметрами: сила струму 280–380 А, частота струму 6 Гц, для поліпшення якості поверхні і внутрішньої структури заготовок;

- підбір і випробування оптимального складу ШОС для захисту меніска металу і мастила кристалізатора: кращі результати по стабільності розливання і якості поверхні отримано при використанні суміші марки Scorialit SPH – C 411–81 / E і Syntherm GB 1640 / M;

- розливання серій плавов з 1–2-х разовою зміною в ході серії положення проміжного ковша з зануреними стаканами (за рахунок періодичного опускання на 30 мм) по висоті зони контакту зі шлаковим поясом і зони роботи ЕМП для забезпечення стійкості занурених стаканів і серійності розливання 4–6 плавов.

В ході розливання серій плавов відпрацьовано технологію запуску резервних струменів, підготовки і перезапуску струменів, закритих з технічних причин і для організації серійності розливання плавов на МБЛЗ.

Досягнуто наступної серійності розливання: вакуумовані плавки: 3–4 в серії; невакуумовані плавки: 4–6 в серії.

У процесі відпрацювання освоєно розливання 28 марок сталі, всього відлито 84625,0 т сортової заготовки, в тому числі 26462,09 т (31,27 %) вакуумована сталь марок 25Г2, 35Г2Ф, 36Г2С, 37Г2С, 5Х42. Вихід придатного металу склав в середньому 96,86 %.

Вимоги, що висуваються до геометричних розмірів і якості поверхні безперервнолитих квадратних заготовок, представлено в табл. 4.

Таблиця 4

Якісні показники безперервнолитої квадратної заготовки

Ширина заготовки, мм	120	150	180
Довжина заготовки, мм	6000–12000		
допустимі відхилення за геометричними розмірами:			
По довжині	+50/–100 мм		
По ширині, мм	+2,5/–3,0	+3,0/–3,0	+3,0/–3,5
Кривизна:	максимум 5 мм на метр довжини, виключаючи торцеві ділянки довжиною 150 мм		
Косина реза:	не більше 7 мм		
Якість поверхні:	Поставка заготовок проводиться в стані виливки, без обробки поверхні. На поверхні литих заготовок немає поясів, слідів від проривів, тріщин, видимих без застосування збільшувальних приладів.		
Стан торців	На торцях заготовок допускаються натіки окисленого металу, що утворюються при газовому різанні на МБЛЗ. На торцях заготовок після вогневого різання на МБЛЗ не допускаються видимі без застосування збільшувальних приладів сліди усадочної раковини		

Кристалізація та структуроутворення сплавів

При розливанні заготовок на кожній плавці проводили відбір темплетів, оцінювали якість макроструктури згідно з ДСТУ 14-1-235-91 (табл. 5) і зміст неметалевих включень згідно з ГОСТ 1778 метод Ш6 за середнім балом максимум на перекованому профілі Ø30 мм (табл. 6). На вимогу замовників оцінювали механічні властивості безперервнолитого металу на перекованому профілі Ø 30 мм відповідно до ДСТУ 1050–88 і вимог специфікацій (табл. 7).

Таблиця 5

Макроструктури безперервнолитої квадратної заготовки

Макроструктура відповідно до ДСТУ 14-1-235-91 за середнім балом максимум	Вісьова (центральна) пористість «ЦП»	Вісьова ліквідація (хімічна неоднорідність) «ОЛ»	Ліквіац. смужки в проміжн. зоні «ЛПТзаг»	Всьові ліквіац. смужки і тріщини «ЛПТ»	Світла смуга «СП»	Крайові точкові забруднення «КТЗ»
Норма по специфікації:	3,0	2,5	1,5	1,0	1,0	1,0
Фактичний середній бал максимум	0,7–2,5	0,5–2,5	0–1,0	0–1,0	0	0–0,5

Таблиця 6

Вміст неметалевих включень у безперервнолитій квадратній заготовці

Вимоги ГОСТ 1778 метод Ш6 за середнім балом максимум (на перекованому профілі Ø30 мм)	Сульфід «С»	Оксиди строчкові «ОС»	Оксиди точкові «ОТ»	Силікати крихкі «СК»	Силікати пластичні «СП»	Силікати недоформовані «СН»
Норма по специфікації:	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Фактичний середній бал максимум	0,5–1,0	0,5–2,0	0	0–2,5	0–0,8	0–2,5

В результаті апробації застосування системи електромагнітного перемішування (ЕМП) сталі в кристалізаторі (М-EMS) з параметрами: сила струму 280–380 А, частота струму 6 Гц та виходячи з даних табл. 5, 6, 7 можна зробити висновок, що якість безперервнолитої квадратної заготовки з шириною сторони 120, 150, 180 мм при використанні електромагнітного перемішувача в кристалізаторі при безперервному розливанні квадратних заготовок задовольняє вимоги нормативно-технічної документації та специфікації замовника.

Також виконано розливання серій плавків з 1–2-х разовою зміною в ході серії положення проміжного ковша з зануреними стаканами (за рахунок періодичного опускання на 30 мм) по висоті зони контакту зі шлаковим поясом і зони роботи ЕМП для забезпечення стійкості занурених стаканів і серійності розливання 4–6 плавків. У процесі відпрацювання освоєно розливання 28 марок сталі, всього відлито 84625,0 т сортової заготовки, в тому числі 26462,09 т (31,27 %) вакуумована сталь марок 25Г2, 35Г2Ф, 36Г2С, 37Г2С, 5ІХ42. Вихід придатного металу склав в середньому 96,86 %.

Таблиця 7

Механічні властивості квадратної заготовки*

Вимоги НД	Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість КСУ ⁺²⁰ , Дж/см ²
150x150 мм					
Норма (за специфікацією)	min 215	min 360	min 35	факультативно	факультативно
St 10	270–325	390–440	35–39	68–74	324–358
Норма (ГОСТ 1050-88)	min 245	min 410	min 25	min 55	–
Сталь 20	310–340	450–490	26–33	57–66	144–216
180x180 мм					
Норма (ГОСТ 1050-88)	min 205	min 330	min 31	min 55	–
Сталь 10	260–320	405–435	33–44	66–76	306–361
Норма (ГОСТ 1050-88)	min 245	min 410	min 25	min 55	–
Сталь 20	305–360	460–520	25–33	55–64	169–236

- * • зразки піддавали нормалізації при температурі 920 +/- 20 °C;
 • випробування на розтяг проводились згідно з ДСТУ 1497;
 • випробування на ударний вигин згідно з ДСТУ 9454 при температурі +20 °C, на зразках з круглим надрізом

Список літератури

- 1 Liao Y., Yao Y. Applications Analysis of the Technology of Mold Electromagnetic Stirring in a Steel Mill. *Advanced Materials Research*. 2013. V. 721. P. 471–474.
- 2 Ефимов В. А. Металлургические аспекты перемешивания сплавов в ковше и затвердевающей слитке / Процессы разливки и кристаллизации стали. Киев: ИПЛ АН УССР. 1991. С. 3–12.
- 3 Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. М.: Металлургия, 1995. 272 с.
- 4 Choudhary S. K. Influence of Modified Casting Practice on Steel Cleanliness. *ISIJ International*. 2011. V. 51 № 4. P. 557–565.
- 5 Sahoo P. P., Kumar A., Halder J., Raj M. Optimisation of Electromagnetic Stirring in Steel Billet Caster by Using Image Processing Technique for Improvement in Billet Quality. *ISIJ International*. 2009. V. 49. № 4. P. 521–528.
- 6 Леман А., Сьоден О., Кучаев А. Применение электромагнитного перемешивания при производстве стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. № 8. С. 79–82.

Надійшла 16.09.2022

References

- 1 Liao Y., Yao Y. (2013). Applications Analysis of the Technology of Mold Electromagnetic Stirring in a Steel Mill / *Advanced Materials Research*. V. 721. P. 471–474.
- 2 Efimov V. A. (1991). Metallurgical aspects of mixing alloys in a ladle and a solidifying ingot / *Processes of casting and crystallization of steel*. Kyiv: IPL of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. P. 3–12. [in Russian].
- 3 Efimov V. A., Eldarkhanov A. S. (1995). Physical methods of influence on the processes of hardening of alloys. M.: Metallurgy. 272 P. [in Russian].
- 4 Choudhary S. K. (2011). Influence of Modified Casting Practice on Steel Cleanliness. *ISIJ International*. V. 51. № 4. P. 557–565.
- 5 Sahoo P. P., Kumar A., Halder J., Raj M. (2009). Optimisation of Electromagnetic Stirring in Steel Billet Caster by Using Image Processing Technique for Improvement in Billet Quality / *ISIJ International*. V. 49. № 4. P. 521–528.
- 6 Lehman A., Sioden O., Kuchaev A. (2004). Application of electromagnetic mixing in steel production. *Metallurgical and mining industry*. No. 8, pp. 79–82. [in Russian].

Received 16.09.2022

A. P. Verzilov, PhD (Engin.), Senior Research Scientist; e-mail: verzilovalex@gmail.com; ORCID 0000-0003-0463-5006

Physico-Techological institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

DEVELOPMENT OF OPTIMAL MODES OF ELECTROMAGNETIC MIXING IN THE MOLD DURING CONTINUOUS CASTING OF BILLETS IN INDUSTRIAL CONDITIONS

Electromagnetic mixing in the mold is one of the most effective methods of physical impact on liquid metal in order to form a high-quality surface and internal structure of a continuously cast ingot. This is due to the fact that the primary crust of the solidifying billets has a small thickness and its thermal resistance to heat transfer to the Crystallizer wall is minimal. Testing of optimal modes of electromagnetic mixing (EM) in the mold during continuous casting was performed for square billets of 120, 150, 180 mm in terms of improving their macrostructure. The principle of operation of EM is based on the principle of operation of an asynchronous three-phase motor, that is, the traveling magnetic field of EM interacts with eddy currents induced in a liquid metal and sets the latter in motion in the direction of movement of the magnetic field. The Danieli Rotelec mixer is mounted on a support that is part of a swing table independent of the Crystallizer. EM is located around the mold body in the upper or lower positions. The EM is powered by a low-frequency power source to increase the depth of penetration of the magnetic field into the liquid phase of the mold ingot. The use of an electromagnetic mixing system of steel in a mold with the following parameters: current strength 280-380 a, current frequency 6 Hz, to improve the surface quality and internal structure of billets was tested. A series of swimming trunks was also poured with a 1-2-time change in the position of the tundish with submerged entry nozzle during the series (due to periodic lowering by 30 mm) along the height of the contact zone with the slag Belt and the EM operation zone to ensure the stability of submerged entry nozzle and the serial casting of 4-6 swimming trunks. In the process of mining, casting of 28 steel grades was mastered, a total of 84625.0 tons of long billet were cast, including 26462.09 tons (31.27 %) of vacuumed steel grades 25G2, 35G2F, 36G2S, 37G2S, 51X42. the yield of suitable metal averaged 96.86 %.

Keywords: metallurgical micro-mill, electromagnetic mixer, mold, continuous casting, billet.