

УДК 621.313:621.746:669.046

Г.І. Касьян, техн. дир.
З.Л. Козлова, пров. інж.
О.А. Кучаєв, д.т.н., пров. н.с.
Р.Я. Якобше, к.т.н., с.н.с.

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ СТАЛІ В ПРОЦЕСІ ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК ДІАМЕТРОМ 150 ММ

Виконано дослідження впливу біжучого магнітного поля в кристалізаторі шестиструмкової машини безперервного лиття заготовок на структуру безперервнолитої круглої заготовки діаметром 150 мм з низьковуглецевої сталі. Показано, що зі збільшенням фазного струму електромагнітного перемішувача, розташованого ззовні кристалізатора машини безперервного лиття заготовок, розширюється зона рівновісних кристалів та зменшується осьова пористість заготовки.

Investigation of travelling magnetic field effect in mold of six strand continuous caster on structure of 150 mm round bullet from low carbon steel are carried out. It is shown that increasing phase current of electromagnetic stirrer installed around of mold is extended the equiaxed crystals zone and is decreased billet axial porosity.

Постановка проблеми

Машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) широко використовуються для виробництва сортових заготовок із вуглецевих та низьколегованих сталей.

Удосконалення технології підготовки металу до безперервного розливання, використання сучасних методів захисту металу, який розливається на всьому шляху від сталерозливного ковша до кристалізаторів, а також застосування зовнішніх впливів на зливки, що тверднуть, сприяють виготовленню заготовок високої якості [1–3].

Безперервнолитої круглі заготовки застосовують для виробництва труб різних діаметрів.

При цьому непотрібна попередня переробка злиwkів квадратного та прямокутного перерізів на круглу заготовку [4; 5].

Серед засобів зовнішнього впливу на метал, що твердне, під час безперервного розливання рідкої сталі застосовують електромагнітні перемішувачі (ЕМП).

Більшість кристалізаторів сортових МБЛЗ оснащують ЕМП для впливу на рідку фазу безперервнолитої заготовки, що дозволяє поліпшити стан їх поверхні та внутрішню структуру. У структурі заготовки є зона стовпчастих кристалів, ширина якої залежить від хімічного складу сталі, перегріву її над точкою ліквідусу, швидкості витягування зливка та умов його вторинного охолодження. Якщо існує широка зона стовпчастих кристалів, у заготовці спостерігається концентрована осьова пористість та ліквіація.

Біжуче магнітне поле циліндричного ЕМП створює примусовий рух рідкої фази заготовки відносно фронту кристалізації та забезпечує більш

високу швидкість переміщення металу порівняно зі швидкістю конвективних потоків. При цьому відбувається прискорення тепло- і масообмінних процесів в об'ємі зливка, що твердне, вирівнюється градієнт температур та усереднюється хімічний склад сталі.

Крім того, під дією потоку металу верхня частина гілок дендритів руйнується. Частина цих уламків розплавляється, знижуючи температуру рідкої фази, інша частина стає додатковими центрами кристалізації. При цьому створюються умови для формування зони рівновісних кристалів, розосереджується осьова пористість та зменшується осьова ліквіація.

Для кожного конкретного випадку оптимальний спосіб електромагнітного перемішування вибирають за маркою сталі, перегрівом металу, розміром перерізу заготовки, швидкістю її витягування [6–8].

Отже, застосування ЕМП поліпшує якість поверхні та макроструктуру заготовки, збільшує вихід придатного металу, підвищує продуктивність МБЛЗ та гнучкість сталеливарного виробництва [9–11].

Експериментальні дослідження

Виплавляння сталі здійснювалось в електродуговій сталеплавильній печі місткістю 120 т. Після обробки рідкого металу на установці ківш – піч масова частка сірки в металі становила менше 0,010 %, фосфору – менше 0,015 %.

Рідку сталь марки Grade В, що містила 0,19 % вуглецю, 0,85 % марганцю, 0,2 % кремнію, 0,008 % сірки, 0,014 % фосфору, 0,1 % хрому,

0,2 % нікелю, 0,25 % міді, 0,019 % алюмінію, 0,05 % ванадію, 0,05 % молібдену, розливали на шестиструмковій МБЛЗ зі сталерозливного ковша місткістю 120 т через 24-тонний дельтоподібний проміжний ківш. З урахуванням підвищених вимог до якості поверхні та внутрішньої структури заготовок застосовували захист струменя металу від вторинного окиснення.

Система захисту металу складається з вогнетривкої труби, стопора-моноблока, стакана-дозатора, зануреного стакана, виготовлених із корундуглецевих матеріалів і спеціальних ущільнювачів стиків. Розливання рідкої сталі з проміжного ковша здійснювалося через стакан-дозатор діаметром 34 мм із зануреним прямоструминним стаканом під рівень металу в кристалізаторі. Як змазку кристалізатора та для захисту меніска металу від окиснення використовували шлакоутворюючу суміш.

Мідний гільзовий кристалізатор, виконаний криволінійним, багатоконусним, має довжину 780 мм. Багатоконусний профіль гільзи кристалізатора дозволяє підтримувати постійний контакт між кіркою заготовки та гільзою. Така конструкція забезпечує рівномірне тепловідведення по всій довжині кристалізатора та отримання необхідної товщини кірки на виході з нього.

Швидкість руху охолоджувальної води в зазорі між гільзою та обичайкою становить 12–15 м/с за максимального вхідного тиску 8 бар. Механізм осциляції кристалізатора електромеханічний, шарнірний, чотириланковий. Залежно від швидкості розливання сталі (амплітуда 0–16 мм, частота до 252 коливань на хвилину) параметри коливання кристалізатора вибирали так, щоб запобігти відвисанню кірки і виключити створення глибоких слідів коливання на поверхні заготовки та проривів металу під кристалізатором.

Керування швидкістю розливання сталі здійснювалось автоматично з допомогою системи вимірювання рівня металу в кристалізаторі, що включає керування стопором з електромеханічним приводом.

Як відомо [2], якість заготовки визначають переважно станом зовнішньої поверхні та макроструктурою.

У процесі виконання роботи було проведено розливання експериментальних плавок з електромагнітним перемішуванням металу в кристалізаторі МБЛЗ під час відливання круглих заготовок діаметром 150 мм.

При цьому в ЕМП фірми Danieli Rotelec здійснювалося регулювання величини електричного струму в діапазоні 200–500 А за частоти 3 Гц. Поздовжній переріз системи МБЛЗ–ЕМП зображено на рис. 1.

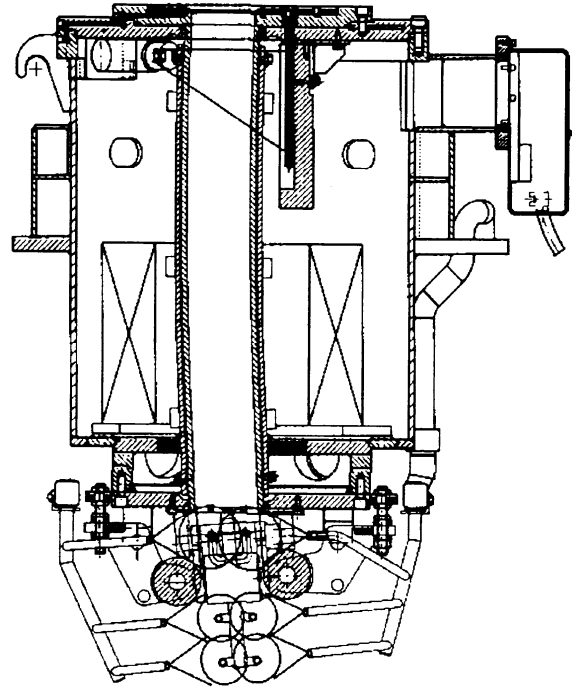


Рис. 1. Система МБЛЗ–ЕМП

Електромагнітні та конструктивні параметри ЕМП такі:

Кількість полюсів.....	2
Кількість фаз.....	3
Струм фази в робочому режимі, А.....	150–500
Частота, Гц.....	3–6
Максимальна повна потужність, кВ·А.....	380
Номінальні витрати води, м ³ /г.....	22
Внутрішній діаметр, мм.....	480
Висота, мм.....	530

Вплив біжучого магнітного поля на макроструктуру безперервної заготовки

Із заготовок, відлитих з різною інтенсивністю перемішування, було відібрано поперечні та поздовжні темплети для дослідження структури металу після поверхневого та глибокого травлення. Макроструктуру литого металу з метою виявлення дефектів оцінювали після його травлення 50-процентним розчином соляної кислоти.

Поперечні та поздовжні перерізи заготовок, відлитих із застосуванням електромагнітного перемішування, показано на рис. 2–5.

Для структури всіх досліджених темплетів характерна осьова пористість, зона якої звужується у міру зростання фазного струму ЕМП. Так, оцінка осьової пористості під дією струму електромагнітного перемішування у 200 А становить 2,5 балу, а під дією струму у 500 А пористість відповідає 1,5–1 балу.

Зі збільшенням струму в обмотці ЕМП до 500 А осьова пористість заготовок зменшується, але при цьому зростає об'єм металу з розосередженою пористістю навколо осі заготовки.

Ці зміни більш чітко видно на поздовжньому темплеті (рис. 5).

Вплив біжучого магнітного поля на поверхневу та підповерхневу структуру круглої заготовки

У досліджених заготовках на відстані 15–45 мм від кірки круглої заготовки в транскристалітній зоні трапляються тріщини, розміщені радіально.

Вони зазвичай мають довжину 2–3 мм за максимальної довжини 6 мм. Найбільш вражені внутрішніми тріщинами заготовки плавки 29543 та 29544, що були відлиті, коли струм в обмотках ЕМП становив 200–300 А. Виявлені тріщини виникли в зоні вторинного охолодження МБЛЗ унаслідок термічних напружень. На поверхні заготовок спостерігаються незначні кристалічні тріщини довжиною 1 мм. Підкоркових пузирів в досліджених темплетях заготовок не виявлено.

Дія біжучого магнітного поля на дендритну структуру заготовок

Виконані дослідження з впливу біжучого магнітного поля ЕМП на формування дендритної структури безпереволитих заготовок свідчать про те, що зі збільшенням струму в обмотці ЕМП скорочується зона стовпчастих дендритів з боку малого радіуса r заготовки за рахунок розширення зони рівновісних кристалів.

За струму 500 А ширина зон транскристалізації з боку великого R і малого r радіусів заготовки стає приблизно однаковою (табл. 1).

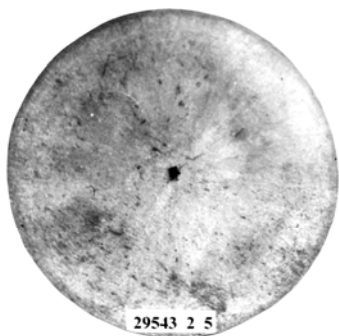


Рис. 2. Макроструктура поперечного перерізу заготовки пл. 29543 2-5 (струм 200 А, частота 3 Гц)

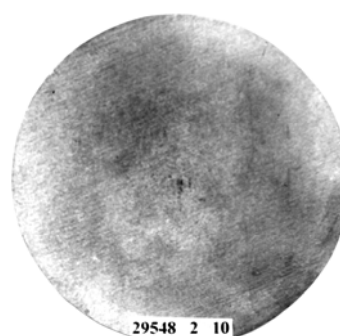


Рис. 3. Макроструктура поперечного перерізу заготовки пл. 29548 2-10 (струм 500 А, частота 3 Гц)

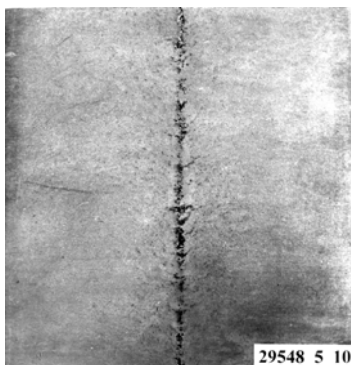


Рис. 4. Макроструктура поздовжнього перерізу заготовки пл. 29548 5-10 (струм 300 А, частота 3 Гц)

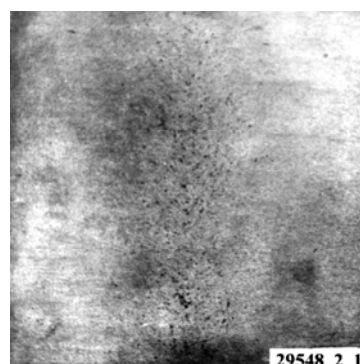


Рис. 5. Макроструктура поздовжнього перерізу заготовки пл. 29548 2-10 (струм 500 А, частота 3 Гц)

Вплив струму електромагнітного перемішувача на процеси теплообміну і формування кірки

У процесі виконання роботи було досліджено дію струму в обмотці ЕМП на процеси теплообміну та формування кіркової оболонки в кристалізаторі МБЛЗ. Також було вивчено особливості впливу інтенсивності перемішування на швидкість кристалізації заготовки в об'ємі рідкого металу, визначено оптимальні режими роботи ЕМП.

Зі створенням кіркової зони та зони направленої кристалізації тепловідведення в бік стінок кристалізатора утруднюється. Внаслідок цього в рідкій частині заготовки створюються рівновісні мікрокристали заліза, які стають перешкодою для зростання стовпчастих дендритів, особливо

з боку великого радіуса заготовки, де вони осаджуються під впливом сили тяжіння. Внаслідок електромагнітного перемішування рідкої сталі частина цих кристалів виноситься з фронту кристалізації і утворює додаткові центри кристалізації, що сприяє об'ємному твердненню рідкої фази заготовки.

Швидкість кристалізації заготовок визначалась залежно від щільності дендритної структури за методикою ЦНДІчорМет [12].

Результати досліджень подані в табл. 2.

Збільшення струму перемішування в обмотці ЕМП сприяє підвищенню інтенсивності відведення тепла від рідкої сталі, збільшує масу твердої фази та товщину кіркової оболонки заготовки на виході з кристалізатора МБЛЗ.

Таблиця 1

Ширина структурних зон заготовок діаметром 150 мм, розлитих на МБЛЗ із застосуванням електромагнітного перемішування

Номер плавки	Електричний струм ЕМП, А	Частота струму ЕМП, Гц	Ширина структурної зони, мм				
			Кірка з боку радіусів		Стовпчасти дендрити з боку радіусів		Рівновісні кристали
			R	r	R	r	
29543 2-5	200	3	3,0	6	33,5	48,0	59,5
29548 5-5	300	3	2,0	2,5-3	28,0	38,0	79,0
29548 2-5	400	3	2,5	3,5	32,5	38,0	73,5
29548 2-10	500	3	2,0	2-2,5	28,0	28,0	90,0
29544 5-5	300	3	2,0	1,5-2,0	26,0	38,0	82,0
29544 2-5	400	6	1,5	2,0	29,5	42,0	75,0
29544 2-10	500	6	1,5	2,0	30,5	33,0	83,0

Таблиця 2

Результати дослідження кристалізації заготовок діаметром 150 мм, відлитих на МБЛЗ із застосуванням електромагнітного перемішування

Параметр	Номер темплету						
	1	2	3	4	5	6	7
Температура металу в проміжному ковші, °С	1544	1551	1551	1551	1551	1551	1551
Швидкість розливання, м/хв	2,35	2,15	2,10	2,20	2,15	2,10	2,20
Маса металу в кристалізаторі, кг	94,12	94,12	94,12	94,12	94,12	94,12	94,12
Час перебування металу в кристалізаторі, хв	0,31	0,34	0,35	0,33	0,34	0,35	0,33
Тепло, що відведене в кристалізаторі, ккал	2344	2261	2646	2541	2213	2597	2495
Тепло перегріву металу, ккал	457	576	576	576	576	576	576
Розрахункова товщина корки, мм	14,9	13,9	16,1	15,9	13,6	16,3	15,5
Розрахунковий коефіцієнт тверднення, см/хв ^{0,5}	2,66	2,40	2,71	2,94	2,34	2,76	2,72
Розрахункова маса твердої фази, кг	23,26	21,88	25,08	24,73	21,39	25,31	24,27
Електричний струм ЕМП, А	200	300	400	500	300	400	500
Частота струму ЕМП, Гц	3	3	3	3	3	6	6
Номер струмка МБЛЗ	2	5	2	2	5	2	2

Висновки

Зі збільшенням інтенсивності електромагнітного перемішування рідкої сталі в кристалізаторі МБЛЗ зменшується ширина зони стовпчастих дендритів, відповідно зростає зона рівновісних кристалів, що поліпшує якість безперервнолитої круглої заготовки (табл. 1).

Осьова пористість усіх досліджених темплетів зменшується у міру зростання фазного струму в обмотці ЕМП. Такий вплив біжучого магнітного поля ЕМП підвищує якість внутрішньої структури заготовки (рис. 3; 5).

Завдяки застосуванню електромагнітного перемішування в кристалізаторі збільшилась продуктивність МБЛЗ за рахунок зменшення вибракування та поліпшення якості центральної частини заготовки. При цьому швидкість розливання сталі зросла на 10 %. Рівень вибракування заготовок із застосуванням електромагнітного перемішування знижується внаслідок більш рівномірного зростання кірки. Використання ЕМП на струмах МБЛЗ значно зменшує кількість раковин і шлаку на поверхні заготовки. Крім того, в досліджених темплетах заготовок не було виявлено підкіркових пупирів.

Література

1. Бойченко М.С., Рутес В.С., Фультмахт В.В. Непрерывная разливка стали. – М.: Металлургиздат, 1961. – 201 с.
2. Теория непрерывной разливки / В.С. Рутес, В.И. Аскольдов, Д.П. Евтеев и др. – М.: Металлургия. – 1971. – 296 с.
3. Eidem M., Hackl H., Kollberg S., Tallback G. Применение устройств электромагнитного перемешивания (EMS) и установок электромагнитного торможения (EMBR) при производстве стали // Междунар. конф. “Черная металлургия России и стран СНГ в 21 веке”: сб. науч. тр. – Т. 2. – 6–10 июня 1994. – М.: Металлургия, 1994. – С. 231–238.
4. Освоение производства непрерывнолитой заготовки на высокоскоростной шестиручевой МНЛЗ / Х.С. Раза, Г.И. Касьян, В.Г. Осипов и др. // Металл и литье Украины. – 2001. – № 5–6. – С. 19–21.
5. Раза Х.С., Касьян Г.И., Сирченко В.И., Фесенко С.М. Отливка заготовок квадратного и круглого сечения на МНЛЗ в условиях ЭСПЦ ЗАО “ММЗ “ИСТИЛ (Украина)” // Металл и литье Украины. – 2006. – № 1. – С. 20–23.
6. Beitelman L. Continuous Casting of Steel Billets with in Mold Dual-Coil Electromagnetic Stirring System // Int. Congress Electromagn. Process of Materials. Paris. May 26–29. – 1997: Proc. – Paris, 1997. – Vol. 2. – P. 335–341.
7. Lehman A, Sjoden O., Kuchaev A. Electromagnetic equipment for non-contacting treatment of liquid metal in metallurgical processes // Magnetohydrodynamics. – 2006. – Vol. 42, No. 2–3. – P. 3–10.
8. Влияние электромагнитного перемешивания на качество непрерывнолитого металла / С.И. Шахов, И.Н. Шифрин, В.Г. Грачев и др. // Черная металлургия: бюл.– 2001. – № 10. – С. 26–30.
9. Влияние интенсивности электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе МНЛЗ на структуру непрерывнолитой заготовки / Р.Я. Яковше, З.Л. Козлова, А.А. Кучаев и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 2. – С. 19–22.
10. Исследование тепловой работы кристаллизаторов МНЛЗ при отливке круглых заготовок диаметром 180 мм / Г.И. Касьян, Р.Я. Яковше, Е.Н. Нагорная и др. // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конгр. “Современные материалы и технологии в металлургии и машиностроении”. – К., 17–21 сент. 2007 г. – С. 134–136.
11. Siddiqui F., Kasyan G.I., Kuchaev A.A., Jakobshe R.J. Application of Electromagnetic Stirring in Caster Mold in Production of Round Billets // Proc. 7th Pamir International Conference on Fundamental and Applied MHD. – Sept. 8–12, 2008. – Giens, France. – Vol. 1. – P. 209–214.
12. Рутес В.С., Акимова Е.И., Филимонова Е.В. Метод определения скорости кристаллизации непрерывнолитой заготовки по дендритной структуре // Бюл. ЦНИИЧерМет. – № 16 (612). – 1969. – С. 1–53.

Стаття надійшла до редакції 13.10.08.