

Таблица 4

Работа изменения параметров состояния газов в доменной печи

Вид работы в доменной печи	Работа, МДж/т чугуна		%	
	ОФ	НФ	ОФ	НФ
1. Образование СО при горении углерода кокса	194,86	192,58	16,85	16,20
2. Образование СО и Н ₂ при горении природного газа	239,61	233,05	20,72	19,60
3. Образование СО при прямом восстановлении железа	70,62	62,34	6,11	5,24
4. Образование СО при восстановлении примесей чугуна	9,35	10,36	0,81	0,87
5. Переход кислорода из шихтовых материалов в газ	134,67	138,60	11,65	11,66
6. Переход летучих кокса в газ	11,62	11,62	1,00	0,97
7. Работа, соответствующая снижению давления природного газа, поступающего в поток дутья	7,35	7,25	0,64	0,61
8. Работа всего газового потока при движении через слой шихтовых материалов	488,21	533,21	42,22	44,85
Всего:	1156,29	1189,01	100	100

окончательно работу идеального газа без химических и иных превращений, сопровождающихся изменением внутренней энергии, определим по формуле

$$A = nRT \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (2)$$

где n – количество молей; R – газовая постоянная. В результате протекания большинства реакций в доменной печи (горение кокса и природного газа, восстановление железа) происходит изменение количества газообразных веществ.

Работу образующихся газов определим по формуле

$$A = (n_2 - n_1)Rd\neq \Delta nRT_1 + \Delta nR(T_2 - T_1), \quad (3)$$

где n_1, n_2 – число молей газообразных веществ в начале и в конце процесса; T_1, T_2 – соответственно температура твердых и газообразных компонентов.

Оценили работу изменения параметров состояния газов в доменной печи при переходе с офлюсованных окатышей на неофлюсованные. Сравнимые периоды имеют длительность по 30 сут.

Полученные результаты представлены в табл. 4.

Таким образом, основными видами являются: работа, совершаемая в результате образования газов при горении кокса и природного газа; работа всего газового потока при движении через слой шихтовых материалов.

В период работы доменной печи на неофлюсованных окатышах величина работы газов, образующихся при горении кокса и природного

газа, уменьшилась на 8,84 МДж/т чугуна (2,03%), что говорит о более эффективном использовании топлива-восстановителя.

Работа газового потока при движении через слой шихтовых материалов в этот период увеличилась на 45 МДж/т чугуна (9,21%), следовательно, более эффективно используется его тепло для процессов восстановления.

Библиографический список

1. Цымбал В. П. Математическое моделирование металлургических процессов. М.: Металлургия, 1986. 240 с.
2. Андрущенко А. И. Основы технической термодинамики реальных процессов. М.: Высш. шк., 1975. 264 с.
3. Евстигнеев В. Л., Почвайтис В. С. Учет затрат тепла на газообразование в закрытой системе при составлении теплового баланса доменной плавки // Сталь. 2004. № 4. С. 18–19.

УДК 621.746.5.047:669.14.063.8:537.86

Великий А.Б., Казаков А.С., Филиппова В.П., Алексеев А.Г.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И ХИМИЧЕСКУЮ НЕОДНОРОДНОСТЬ СОРТОВОЙ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

В настоящее время электромагнитное перемешивание (ЭМП) жидкого металла на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является неотъемлемой частью прогрессивной технологии получения высококачественного металла. Наибо-

лее широко устройства для ЭМП применяются на сортовых МНЛЗ, что объясняется меньшими размерами поперечного сечения отливаемой заготовки. Эти устройства могут размещаться в различных частях машины в зависимости от решаемых

задач. ЭМП способствует уменьшению ширины зоны столбчатых кристаллов и расширению зоны неориентированных кристаллов, снижению химической неоднородности заготовки, очищению металла от неметаллических включений и растворенных в жидкой стали газов. Положительное воздействие этой системы достигается в результате создания с помощью электромагнитных сил вынужденной циркуляции жидкого металла. Это улучшает теплообмен между жидкой и твердой фазами, вследствие чего снижается перегрев металла перед фронтом кристаллизации. При этом ухудшаются условия для роста столбчатых кристаллов, вызывающих анизотропию свойств затвердевшего металла. Кроме того, циркуляционные потоки жидкого металла обламывают выступающие вершины и ветви столбчатых кристаллов, способствуя образованию дополнительных центров кристаллизации неориентированных, так называемых полиэдрических, кристаллов. Также улучшаются условия для всплывания неметаллических включений и удаления из заготовки растворенных в жидком металле газов.

Из многочисленных исследований известно, что интенсивность электромагнитного перемеши-

вания обычно характеризуется скоростью вихревого потока жидкого металла. Количественно эта скорость определяется моментом вращения потока под воздействием электромагнитного поля. В работе [1] говорится о том, что момент вращения потока зависит как от параметров магнитного поля, так и от размеров устройства перемешивания. При использовании любого устройства с конкретными неизменными размерами с целью варьирования интенсивности перемешивания металла необходимо изменять параметры магнитного поля. Такими параметрами являются частота и сила применяемого в устройстве тока. Для каждого кристаллизатора существует оптимальная частота тока, при которой жидкой стали передается максимальный момент вращения. В настоящей работе рассматривается влияние основных регулируемых параметров процесса ЭМП на структуру и химическую неоднородность сортовой заготовки.

В условиях ЭСПЦ ОАО «ММК» непрерывная разливка стали для получения сортовых непрерывнолитых заготовок производится на двух МНЛЗ, разработанных и поставленных фирмой «VAI». Эти машины являются радиальными с базовым радиусом 9 м и имеют по пять ручьёв. Проектная годовая производительность каждой МНЛЗ составляет 1 млн т заготовки. В основном отливаются непрерывнолитые заготовки с размерами поперечного сечения 150×150 мм. Гильзовый многоконусный кристаллизатор «Diamond» имеет длину 900 мм. Непрерывная разливка стали осуществляется по двум базовым режимам: открытой и закрытой струями. Открытой струёй разливаются стали с содержанием растворённого алюминия не более 0,006%. При большем содержании алюминия разливка производится закрытой струёй. Одинаковым для обоих режимов разливки является использование защитных труб на участке сталеразливочный – промежуточный

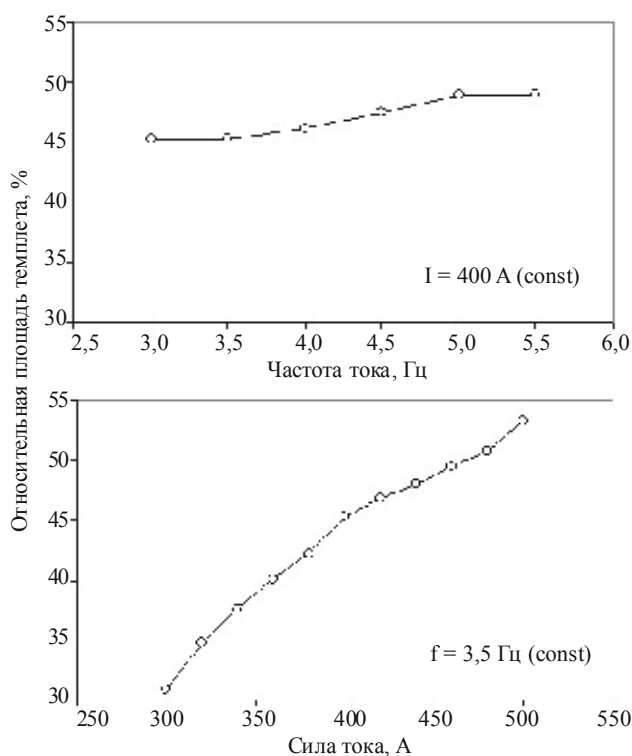


Рис. 1. Зависимость относительной площади поперечного темплетта заготовки с размерами 150×150 мм, занимаемой полиэдрическими кристаллами, от частоты тока (вверху) и силы тока (внизу) в устройстве ЭМП

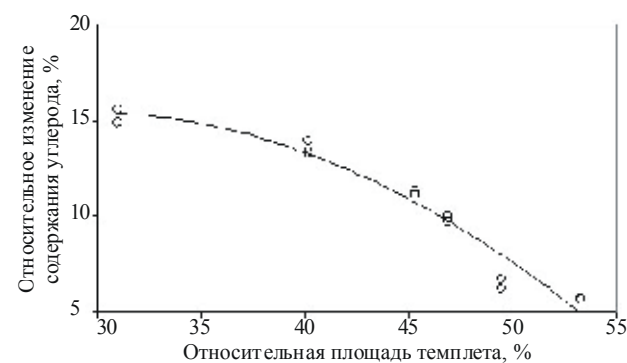


Рис. 2. Зависимость относительного изменения содержания углерода в металле от относительной площади темплетта, занимаемой полиэдрическими кристаллами

ковши и теплоизолирующих смесей в промежуточном ковше. В настоящее время большая часть металла разливается открытой струёй. В этом режиме дозирующими элементами металлической проводки являются постоянные верхние и сменные нижние циркониевые стаканы марки "Justal" с внутренними каналами диаметром 15...20 мм. Смена стаканов осуществляется при помощи специальных механизмов быстрой замены CNC фирмы "Vesuvius". Для смазки в кристаллизатор через кольцевой зазор подаётся растительное (рафинированное рапсовое) или синтетическое масло фирм "Mobil" или "Shell". Кристаллизатор одной из машин (МНЛЗ № 2) оборудован устройством электромагнитного перемешивания жидкого металла фирмы "ABB Automation Systems" [2]. Данное устройство представляет собой укороченную катушку, расположенную с внешней стороны нижней части кристаллизатора. Частота питающего тока равняется 3...5 Гц. Напряжение составляет 500 В, а средняя сила тока – 500 А. Устройство обладает кажущейся мощностью 433 кВА.

При выборе данной конструкции учитывались следующие положительные свойства данного типа ЭМП:

- меньшая на 25% стоимость устройства по сравнению с двухкатушечным вариантом;
- совместимость с существующей конструкцией кристаллизаторов фирмы «VAI», так как использование двухкатушечного устройства исключило бы возможность применения радиоактивного датчика для поддержания уровня металла в кристаллизаторе;
- простота в обслуживании и эксплуатации.

С целью изучения влияния параметров ЭМП на процесс формирования кристаллических зон заготовки и развитие химической неоднородности металла были проведены исследования при непрерывной разливке стали с содержанием углерода 0,65...0,90%. Разливка стали осуществлялась открытой струёй на заготовки с размерами поперечного сечения 150×150 мм. В ходе исследований варьировались частота тока в диапазоне 3,0...5,5 Гц при постоянной величине силы тока, равной 400 А, а также сила питающего устройства тока в интервале 300...500 А при постоянной частоте тока, составлявшей 3,5 Гц. Из отлитых заготовок вырезались поперечные темплеты, на поверхности которых после соответствующей обработки оценивалась относительная площадь, занимаемая полиэдрическими кристаллами. Результаты влияния частоты и силы тока в устройстве ЭМП на относительную площадь поперечного темплета сорто-

вой заготовки, занимаемую полиэдрическими кристаллами, представлены на рис. 1.

Сравнительный анализ данных, приведенных на этом рисунке, показывает, что в рассмотренных диапазонах изменения двух параметров на размеры зоны полиэдрических кристаллов существенно сильнее (примерно в 6 раз) влияет сила питающего тока. Так, при увеличении силы тока размеры этой зоны возросли на 22,3% (с 31,0 до 53,3%), а при увеличении частоты тока – лишь на 3,7% (с 45,3 до 49,0%).

Из верхней части рис. 1 видно, что при постоянной величине силы тока зона полиэдрических кристаллов имеет максимальную площадь при частоте тока 5 Гц. Дальнейшее увеличение частоты тока, питающего устройство ЭМП, не вызывает изменения этой площади. Это, очевидно, свидетельствует о том, что такая частота тока является наиболее рациональной для данного типа устройства.

Расширение зоны полиэдрических кристаллов способствует уменьшению ликвации примесей, растворённых в металле. Это показано на примере изменения содержания углерода в металле на поверхности поперечного темплета из сортовой заготовки. Так, на рис. 2 приведена зависимость относительного изменения содержания углерода от размеров зоны полиэдрических кристаллов.

Относительное изменение содержания углерода подсчитывалось, как отношение разности между максимальным и минимальным содержанием элемента в металле на поверхности поперечного темплета к исходному содержанию элемента в ковшевой пробе, выраженное в процентах.

Зависимость относительного изменения содержания углерода ($\Delta[C]$, %) от относительной площади темплета, занимаемой полиэдрическими кристаллами, (ΔS , %) выражается в виде уравнения

$$\Delta[C] = -0,018\Delta S^2 + 1,038\Delta S + 0,41, \quad \eta = 0,976.$$

Сравнение вычисленного значения t -критерия, равного 0,150, с его критической величиной $t_{0,05}=2,074$ при $F=1,01$ и $F_{0,05}=2,82$ свидетельствует о статистической значимости полученной зависимости.

Таким образом, при ЭМП жидкого металла в нижней части кристаллизатора сортовой МНЛЗ удаётся увеличить размеры зоны полиэдрических кристаллов и уменьшить химическую неоднородность отливаемой заготовки. Наиболее сильное влияние на размеры этой зоны оказывает сила тока, питающего устройство для ЭМП. Выявлена рациональная величина частоты тока для данного типа устройства.

Библиографический список

1. Beitelman L. Effect of mold EMS design on billet casting productivity and product quality //Canadian Metallurgical Quarterly. 1999. № 5. P. 301–309.
2. Влияние электромагнитного перемешивания на качество макроструктуры и поверхности непрерывнолитых заготовок производства МЦ ОАО “ММК”/ Казаков А.С., Суспицин В.Г., Зимина Л.А., Ушаков С.Н. // Совершенствование технологии в ОАО “ММК”: Сб. трудов Центральной лаборатории ОАО “ММК”. Вып. 9. Магнитогорск: Дом печати, 2005. С. 95–98.

УДК 621.771

Сычков А.Б.

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Качественные параметры высокоуглеродистой катанки нормируются в нормативной документации (НД) и требованиями потребителей. К этим параметрам можно отнести химический состав стали, дефектность поверхности, степень обезуглероживания, чистоту стали по неметаллическим включениям (НВ), макро- и микроструктуры, механические характеристики и т.п. [1–5]. Однако имеется ряд проблем, которые следует разрешить, чтобы повысить, в целом, комплекс свойств катанки и технологичность её переработки на металлургическом переделе. Одной из этих проблем является чистота стали по НВ, повышение которой способствует улучшению исходной пластичности катанки и деформируемости её при волочении в проволоку и при свивке в пряди, канатные конструкции и металлокорд [6–11].

В процессе освоения высокоуглеродистой катанки наблюдалось устойчивое и монотонное снижение загрязненности стали НВ. Однако в последнее время наблюдается обратная картина: постепенно повышаются параметры, связанные с увеличением загрязненности стали НВ. Это, по видимому, обусловлено неэффективной технологией вакуумирования стали: применением так называемой обратной схемы. Эта схема предусматривает вакуумирование стали на вакууматоре камерного типа (VD), обработку стали на установке ковш-печь (УКП). Когда вакуумирование металла проводится до его выпечной обработки на УКП, металл может получить НВ из материалов, присаживаемых после вакууматора на УКП. Не отлажена также и технология с применением полностью магнезиальных сталеразливочных ковшей (СК), а склонность при разливке к затягиванию ручьев алюминийсодержащими настывами предопределяет значительный перегрев стали над расчетной температурой ликвидуса, что формирует развитую дендритную ли-

квационную макроструктуру НЛЗ и способствует увеличению загрязненности стали НВ.

С целью повышения чистоты высокоуглеродистой стали по НВ и выработки критериев предельно допустимой загрязненности металла было проведено несколько мероприятий. К ним относятся применение полностью магнезиальных кирпичных сталеразливочных ковшей, в том числе и днища СК (плавка 1, сталь марки С82D), обработка стали на сливе из ДСП в СК белыми, синтетическими шлаками (плавки 2 и 3, сталь 80КРД), модифицирование НВ смешанной лигатурой, содержащей кальций и редкоземельные металлы (серия плавов 4...11, сталь марки С82D – опытные и контрольные плавки).

Применение полностью магнезиального СК

Неметаллические включения в НЛЗ (плавка 1) количественно оценивались на кованых пробах от 6-ти темплетов, отобранных от каждого ручья МНЛЗ, по ГОСТ 1778, метод Л1. Следует отметить, что во всех образцах подавляющее большинство НВ (97...98.7% оксидов и 91.5...99.2% сульфидов) имеют размеры 0...5.6 мкм (1-я группа НВ по методу Л1 ГОСТ 1778); остальные НВ распределены по размерам таким образом:

- 2 группа (5.9...11.2 мкм) – 0.7...4.2% для оксидов и 0.8...6.7% для сульфидов;
- 3 группа (11.5...16.8 мкм) – 0...0.9% – оксиды и 0...1.8% – сульфиды;
- 4 группа (17.1...22.4 мкм) – 0...0.9% – оксиды, сульфидов нет;
- 5 группа (22.7...28 мкм) – 0...0.3% – оксиды, сульфидов нет;
- 7 группа (33.8...39.2 мкм) – 0...0.7% оксиды, сульфидов нет.

То есть в кованых образцах НЛЗ наблюдаются достаточно мелкие НВ (оксиды протяженностью до 11.5 мкм в 97.7...100% случаев по отдельным образцам; сульфиды – 16.8 мкм в 100%