

## ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОСТАЛИ

*Керимов Р.И.*

*ООО «Baku Steel Company», г.Баку*

**Ключевые слова:** непрерывнолитые заготовки, электромагнитное перемешивание, флокены, дегазация жидкой стали, ликвация, неоднородность, магнитное поле.

**Аннотация.** В статье приводятся результаты исследования электромагнитного перемешивания и дегазации электростали при непрерывной разливке. Исследована электросталь, выплавленная из шихты металлических отходов и окатышей, полученных из Дашкесанского концентрата. Показано, что плохая дегазация стали приводит к образованию таких структурных дефектов, как трещины, флокены и т.д. В результате дегазации электро-стали при непрерывной разливке общее количество оксидов уменьшается примерно в 2 раза.

Разработана опытный образец роликового электромагнитного перемешивателя (РЭМП) жидкой стали в стали в кристаллизаторе. Результаты исследований показывают, что возникающий под воздействием РЭМП поток жидкого металла вымывает из двухфазной зоны долю легирующих элементов. В результате РЭМП достигнуто улучшение качества сортовых непрерывнолитых заготовок.

Опробована также технология улучшения качества стали путем электромагнитного перемешивания жидкой электростали при получении сортовых заготовок. В результате воздействия электромагнитного перемешивания на кристаллизующийся металл происходили увеличение однородности распределения легирующих элементов; уплотнение центральной зоны заготовок и значительно уменьшилась ликвация в электростали.

**Введение.** В настоящее время весьма остро стоит вопрос снижения металлоемкости при производстве строительных арматур, профилей различного назначения и труб для нефтегазовой промышленности, так как масштабы экономии металла в этом случае несоизмеримы ни с чем [1, 2].

Снижение металлоемкости строительной и нефтегазовой промышленности можно достичь путем внедрения эффективных технологических процессов получения металлизированного окатыша прямым восстановлением руды, выплавки стали в электропечи и непрерывной разливки заготовок. Сущность способа непрерывной разливки заключается в том, что жидкую сталь непрерывно заливают в водоохлаждаемую изложницу без дна- кристаллизатор, из нижней части которого вытягивают затвердевшей по периферии слиток с жидкой сердцевиной. Даже слиток, предназначенной для получения заготовки различного профиля, движется через зону вторичного охлаждения, где полостью затвердевают в цельной или полой конфигурации, после чего разрезают на куски определенной длины. Разливка ведется до израсходования металла в сталеразливочном ковше или же разливается без перерыва металл из нескольких ковшей (разливка методом плавки на плавку). Полученные куски отлитого металла являются исходными заготовками для изготовления металлопродукций различных размеров. Такая металлургическая технология получения заготовок обеспечивает снижение металлоемкости изделий. Однако еще неисчерпаны возможности экономии металла непосредственно при прокатном производстве [3, 4].

Поэтому проведение научно-исследовательских работ по получению заготовок с учетом возможностей экономии металла непосредственно при технологическом цикле прокатного производства является весьма актуальной научно-технической задачей.

**Целью данной работы** является исследование металлургической технологии получения непрерывнолитых заготовок применением физических методов воздействия на электросталь для улучшения её качества.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка новых технологических процессов, таких как электромагнитное перемешивание и дегазация электростали при непрерывной разливке.

2. Оценка качества электростали после физических методов воздействия на её структуру и свойства.

**Дегазация электростали при непрерывной разливке.** ООО «Baku Steel Company» выпускает продукции – строительную арматуру, трубы и профили различного назначения. При этом в качестве исходных материалов используются либо металлические отходы собственного производства и машиностроительных предприятий, либо эти же металлические отходы с некоторым количеством окатышей, полученных из дашкесанского концентрата.

Используя окатыши, полученные из дашкесанского концентрата, проводили плавку электросталей для получения арматур и трубных заготовок. При формировании качественных показателей сталей уровень дегазации их в процессе непрерывной разливки является одним из определяющих факторов, поскольку плохая дегазация стали приводит к образованию структурных дефектов, таких как трещины, флокены и т.д.

Образование трещин и флокенов при охлаждении электростали объясняется следующим образом [5, 6].

Флокены образуются в сталях, насыщенных водородом. Водород выделяется в отдельных микрообъемах и накапливаясь в них, развивает очень большое давление, которое превышает прочность металла и приводит к образованию внутренних трещин. Образование флокенов спонсируют те напряжения, которые возникают в металле вследствие разновременности фазовых превращений из-за физической и химической неоднородности стали.

Их можно обнаружить в изломе металла, в котором они имеют вид серебристых пятен круглой или овальной формы (рис. 1), а в продольном и поперечном сечениях после травления (рис. 2) - видны в виде продольных и радиальных трещин.

По размерам флокены могут быть весьма мелки и довольно значительными.

Нами разработана технология дегазации металла при его непрерывной разливке (0,5-0,7м/с) на сортовые заготовки на участке «сталеразливочный ковш-промежуточный ковш».

Были изготовлены промышленные образцы устройства, представляющего собой камеру массой 8 кг с профилированным соплом, обеспечивающим разрежение в околоструйном пространстве в процессе истечения газов, например, аргона, азота, сжатого воздуха.



Рис.1. Флокены в изломе



Рис. 2. Флокены в стали

Устройство, установленное на шибберном затворе 50-т разливочного ковша, опробовано при расходе воздуха  $35 - 55 \text{ м}^3/\text{ч}$  и давлении  $0,16 - 0,20 \text{ МПа}$ .

Результаты непрерывной разливки стали с дегазацией по сравнению с защитой металла от вторичного окисления с помощью керамической трубы (табл.1) показали значительное снижение содержания кислорода (на 45% отн.) и водорода (на 20% отн.) и небольшое – азота (4,0% отн.).

Оценку загрязненности стали неметаллическими включениями проводили по методике II ГОСТ1778-80 путем определения площади, занимаемой оксидами. Из осевой зоны непрерывнолитой заготовки размерами  $400 \times 300 \text{ мм}$  вырезали образцы сечением  $10 \times 10 \text{ мм}$  и длиной  $300 \text{ мм}$ , соответствующей высоте заготовки от ее малого к большому радиусам.

По результатам исследования общее количество оксидов при дегазации стали 20 уменьшалось примерно в 2 раза (табл. 2). При этом в максимальной степени снизилось количество оксидов со стороны малого радиуса (3,23 раза) и в минимальной степени – со стороны большого радиуса (0,70 – 1,14 раза) и в осевой части слитка (1,75 раза). Аналогичные результаты получены и для стали 40; при этом минимальное уменьшение количества оксидов наблюдается в наиболее загрязненной- осевой части непрерывнолитого слитка (2,20 – 2,5 раза).

Табл. 1. Содержание газов в непрерывнолитых заготовках при защите от вторичного окисления струи стали с использованием керамической трубы (А) и дегазации металла (Б)

Марка стали		Сталь 20	Сталь 40
Защита А	[H], мг/100г	$\frac{3,00 - 3,18}{3,1}$	$\frac{3,00 - 3,18}{3,1}$
	[N], %	$\frac{3,00 - 3,18}{3,1}$	$\frac{3,00 - 3,18}{3,1}$
	[O], %	$\frac{3,00 - 3,18}{3,1}$	$\frac{3,00 - 3,18}{3,1}$
Б*	[H], мг/100г	$\frac{2,40 - 2,60}{2,50}$	$\frac{2,40 - 2,60}{2,50}$
	[N], %	$\frac{2,40 - 2,60}{2,50}$	$\frac{2,40 - 2,60}{2,50}$
	[O], %	$\frac{2,40 - 2,60}{2,50}$	$\frac{2,40 - 2,60}{2,50}$
Δ, % отн.**	[H]	21,05	22,90
	[N]	3,3	5,0
	[O]	40,0	38,7

\*В числителе – данные по ГОСТ 1778-80, в знаменателе – фактические данные.

\*\* Δ - уменьшение площади оксидов при применении дегазации.

Табл. 2. Площадь\* (мм), занимаемая оксидами в непрерывнолитой заготовке из стали 20 и 40 при защите от вторичного окисления струи металла путем использования керамической трубы (А) и дегазации (Б)\*\*\*

ℓ**, мм	А	Б	Δ, % отн.
	Сталь 20		
25	$\frac{0,120 - 0,920}{0,520}$	$\frac{0,130 - 0,190}{0,160}$	69,2
75	$\frac{0,840 - 1,100}{0,90}$	$\frac{0,137 - 0,700}{0,418}$	56,9
125	$\frac{1,410 - 1,600}{1,505}$	$\frac{0,580 - 1,110}{0,845}$	43,9
175	$\frac{0,127 - 0,730}{0,428}$	$\frac{0,120 - 0,270}{0,195}$	54,4
225	$\frac{0,102 - 0,210}{0,156}$	$\frac{0,060 - 0,210}{0,135}$	13,5
275	$\frac{0,030 - 0,100}{0,065}$	$\frac{0,090 - 0,100}{0,095}$	-46,1
	Сталь 40		
25	$\frac{0,220 - 0,340}{0,280}$	$\frac{0,045 - 0,050}{0,047}$	83,2

$l^{**}$ , мм	А	Б	$\Delta$ , % отн.
Сталь 40			
75	$\frac{0,900 - 1,080}{0,990}$	$\frac{0,020 - 0,450}{0,235}$	76,3
125	$\frac{0,040 - 0,780}{0,410}$	$\frac{0,040 - 0,330}{0,185}$	54,9
175	$\frac{0,100 - 0,300}{0,200}$	$\frac{0,030 - 0,130}{0,080}$	60,0
225	$\frac{0,120 - 0,260}{0,190}$	$\frac{0,040 - 0,060}{0,050}$	73,7
275	$\frac{0,090 - 0,250}{0,170}$	$\frac{0,040 - 0,060}{0,050}$	70,6
* $\Delta$ - уменьшение площади оксидов, ** $l$ - расстояние по высоте заготовки от г к R. ***В числителе данные - по ГОСТ 1778-80, в знаменателе – фактические данные			

**Электромагнитное перемешивание при непрерывной разливке.** В последние годы для повышения качества металла при непрерывной разливке получило развитие электромагнитное перемешивание жидкой сердцевины слитков [7, 8]. За рубежом роликовые электромагнитные перемешиватели (РЭМП), разработанные фирмой «Rotelek» [8], применяют при отливке на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) слябов сечением 150-250×800-2150 мм; минимальный наружный диаметр РЭМП составляет 240 мм.

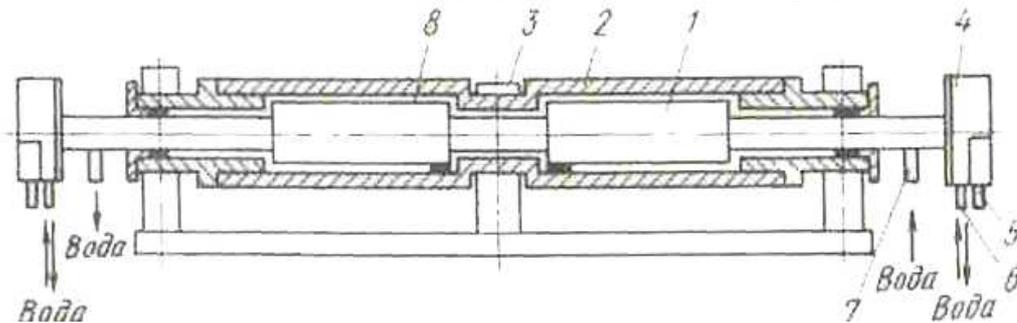
Нами приводятся результаты промышленного опробования опытных образцов РЭМП, созданных специалистами ЦНИИчермета, НПО ВНИИметмаш и ОАО «Азербору».

Было изготовлено два опытных образца РЭМП (рис.3). Перед установкой РЭМП на МНЛЗ проводили стендовые испытания его для определения индукции магнитных полей (рис.4), энергетических параметров и степени нагрева обмотки при различных значениях силы фазного тока. Исследования показали, что при номинальной силе тока (420 А) шихтованный магнитопровод статора находится в насыщенном состоянии вследствие отсутствия экрана между обмоткой статора и магнитопроводом. Поэтому при повышении силы тока фазы заметного увеличения индукции магнитного поля не происходит. Измерение характеристик магнитных полей РЭМП позволило существенно уточнить методику расчета электродинамики РЭМП с учетом дискретности обмотки и степени насыщения магнитопровода.

Опробование РЭМП провели в трубном цехе ООО «Baku Steel Company» при непрерывной разливке стали СтЗсп, 10 сп, 20 и 40 на заготовки сечением 250×1710 мм. На МНЛЗ выполнили монтаж первой пятироликовой секции с двумя РЭМП, расположенными по малому и большому радиусам один против другого на расстоянии 5 м от верхнего среза кристаллизатора. Наладка двухфазного источника питания и системы управления РЭМП позволила осуществлять питание перемешивателя переменным током силой до 1000 А при частоте 0,1-5 Гц. Горячее опробование РЭМП провели при разливке со скоростью 0,6 м/мин серии плавков стали СтЗсп с температурой от плавки к плавке 1525 – 1545°С.

Основным регулируемым параметром электромагнитного перемешивания являлась частота тока питания, которая варьировалась от 2 до 5 Гц при номинальном значении силы тока 425 А. В процессе горячего опробования проводили регулярный осмотр оборудования и измерение сопротивления изоляции обмоток РЭМП. После разливки первой плавки сопротивление изоляции снизилось до 1,5 кОм, а после разливки шестой плавки сопротивление изоляции фазы А снизилось уже до 500 Ом, фазы В-до 50 Ом, что объясняется попаданием воды в контактный узел РЭМП.

В связи с этим в нижней части корпуса контактного узла сделали дренаж для удаления накапливающейся во внутренней полости корпуса воды.



1- статор РЭМП; 2- оболочка опорного ролика; 3- промежуточная опора; 4- клемные узлы; 5- ввод питания обмотки; 6- подвод (отвод) дистиллированной воды охлаждения обмотки; 7- подвод (отвод) технической воды охлаждения оболочки ролика; 8- кольцевой зазор между статором и оболочкой ролика

Рис. 3. Роликовый электромагнитный перемешиватель с промежуточной опорой для слябовых МНЛЗ

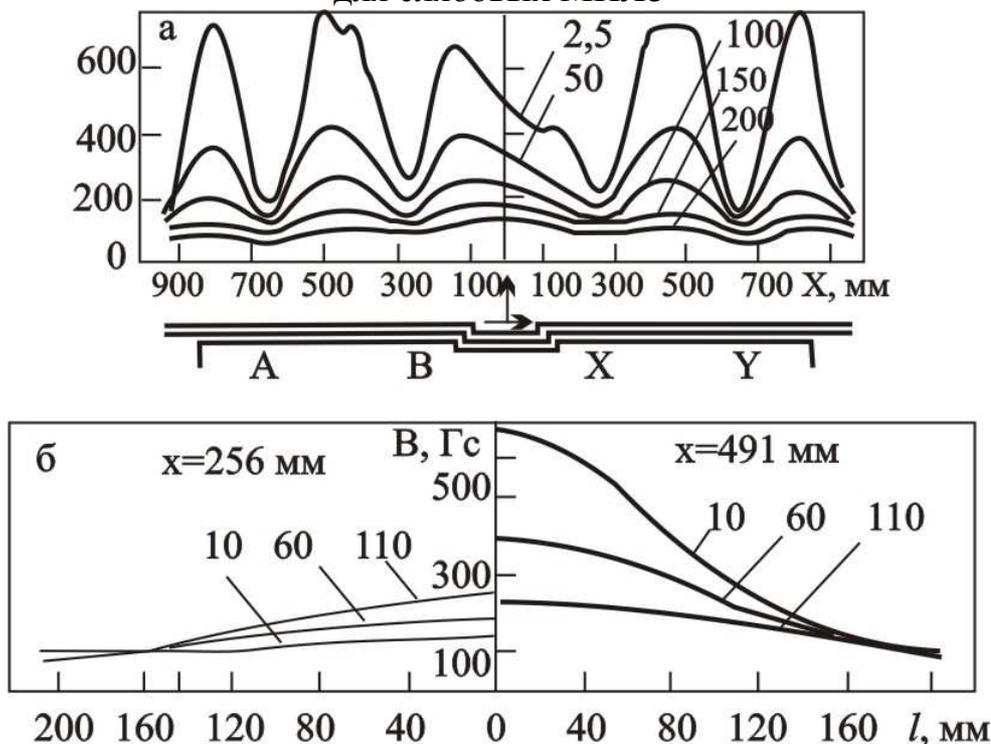


Рис. 4. Экспериментальные кривые распределения нормальной составляющей индукции магнитного поля (В) по длине РЭМП (а) и по ширине (б) над серединой зубцов ( $x=491$  мм) и над серединой катушки ( $x=256$  мм) на различном расстоянии (у-цифры у кривых, мм) от поверхности ролика при  $f=4$  Гц и  $I_{\phi}=420$  А ( $x$ - расстояние от оси промежуточной опоры по линии ролика)

При этом сопротивление обеих фаз относительно земли повысилось до 6-7кОм. Других замечаний по работе секции РЭМП в период горячего опробования не было.

Как известно, основной целью применения внешнего воздействия на кристаллизующийся слиток в зоне вторичного охлаждения, в том числе и РЭМП, является улучшение эксплуатационных характеристик готовой металлопродукции путем снижения осевой ликвации, повышения плотности центральной зоны, расширения зоны равноосных кристаллов, повышения химической и структурной однородности слитка [9 – 14].

В процессе промышленного опробования через секцию РЭМП разлили 50 плавов (около 10 тыс.т) различных марок стали; от 30 плавов отобрали образцы металла. Как и в период горячего опробования, технологические параметры разливки соответствовали требованиям технологических инструкций и составляли: скорость вытягивания слитка 0,6-0,8 м/мин, температура в промежуточном ковше стали 10 и 20 преимущественно 0,1530-1545<sup>0</sup>С. В режиме перемещения в основном варьировали частотой питающего тока от 2 до 5 Гц и силой тока от 425 до 475 А. На двух плавках применили перемешивание с реверсом (длительность включения «вперед» и «назад» соответственно по 15 с. практически без паузы между переключениями).

Предварительная оценка гидродинамических особенностей РЭМП показала, что роликовый перемещиватель при установке его на МНЛЗ на уровне 5,0 м от верхнего среза кристаллизатора не обеспечивает необходимого характера потоков металла. Скорость движения металла составляет около 0,1-0,15 м/с. В этой связи при исследовании качества металла обращали внимание прежде всего на наличие на серных отпечатках «светлой полосы»- как индикатора движения металла вдоль фронта затвердевания. Существенного влияния РЭМП на изменение структуры слитка не ожидали.

По расчетным данным (табл. 3) толщина корочки слитка (b) в зависимости от скорости разливки (v) колеблется от 72,0 до 62,5 мм, количество жидкой фазы (q) в районе установки РЭМП от 42,4 до 50% (τ- продолжительность затвердевания слитка). По существующим представлениям и экспериментальным данным такое количество жидкой фазы является достаточным для организации перемешивания металла.

Табл. 3. Расчетные данные

v, м/мин	τ, мин	b, мм	q, %
0,6	8,3	72,0	42,4
0,7	7,14	66,7	46,8
0,8	6,25	62,5	50,0

Воздействие РЭМП на макроструктуру проявляется в виде слабо выраженных ликвационных полосок шириной 5 – 10 мм, образующих светлый контур различной интенсивности на расстоянии 66-75 мм от поверхности (в поперечном сечении слитка) в зависимости от скорости разливки. На рис.5 показан серный отпечаток образца литой стали 10 сп; подобный вид имеют серные отпечатки стали других марок. Влияние работы РЭМП на другие параметры микроструктуры не выявили.

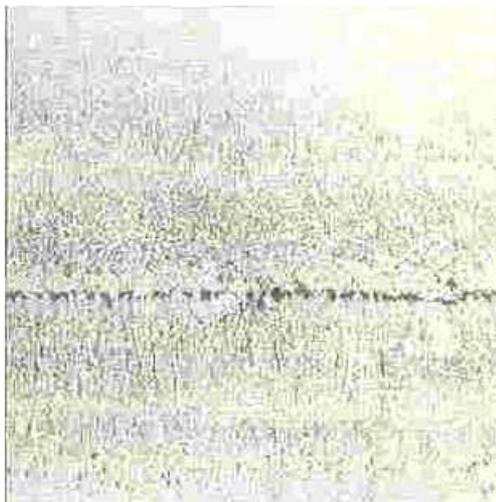


Рис. 5. Отпечатки по Бауману стали 10 сп с контурами светлой полосы

Независимо от наличия перемешивания осевая ликвация составляет 1-3 балла, точечная ликвация до 3,5 балла по малому и до 2,0 баллов по большому радиусам. Пористость, наличие трещин, развитие зоны транскристаллизации, зоны равноосных кристаллов в центральной части заготовки определяются в большей степени условиями и технологическими параметрами разливки.

Ширина зоны равноосных кристаллов в центральной части слитка практически не развита, что и обуславливает довольно интенсивную осевую ликвацию. При определении химической неоднородности стали 20 (0,18% С, 0,025% S и 0,80% Mn) по сечению слитка, имеющего светлую полосу, поперечный темплет был размечен на 14 участков шириной 1 см.

Зона светлой полосы попала на участок 7, а осевая зона на участок 12. На всех участках, кроме 7, проба металла брали сверлом диаметром 6 мм в трех точках. На участке 7 для получения более достоверных данных пробы отбирали фрезерованием и анализировали послойно каждые 2 мм.

Результаты исследований (рис.б) показывают, что возникающий под воздействием РЭМП поток жидкого металла вымывает из двухфазной зоны долю ликвирующих элементов, обедняя слой затвердевающего слитка, находящегося в зоне действия РЭМП. При разливке углеродистой и низколегированной стали заметного влияния внешнего воздействия на объемное содержание неметаллических включений размером 40 мкм не наблюдали. Однако при скорости разливки 0,6м/мин и частоте питающего тока 3Гц распределение включений по сечению слитка было более равномерным. Опытные образцы РЭМП не смогли обеспечить достаточную интенсивность перемешивания ввиду насыщения магнитной системы статора.

В процессе опытно-промышленного опробования РЭМП выявили ряд недостатков, прежде всего появление сетки трещин разгара на теле ролика, что указывает на недостаточную жаростойкость выбранной марки стали для ролика 20X23H18.

Эксплуатация в производственных условиях системы охлаждения обмотки статора дистиллированной водой при ее подводе от магистрали к роликам показали необходимость специальной водоподготовки. Целесообразно охлаждение обмотки технической водой и применением водостойкой изоляции, что значительно упрощает конструкцию статора РЭМП.

В настоящее время нами разрабатывается новая усовершенствованная конструкция РЭМП. Для тела ролика используется специальная жаропрочная сталь.

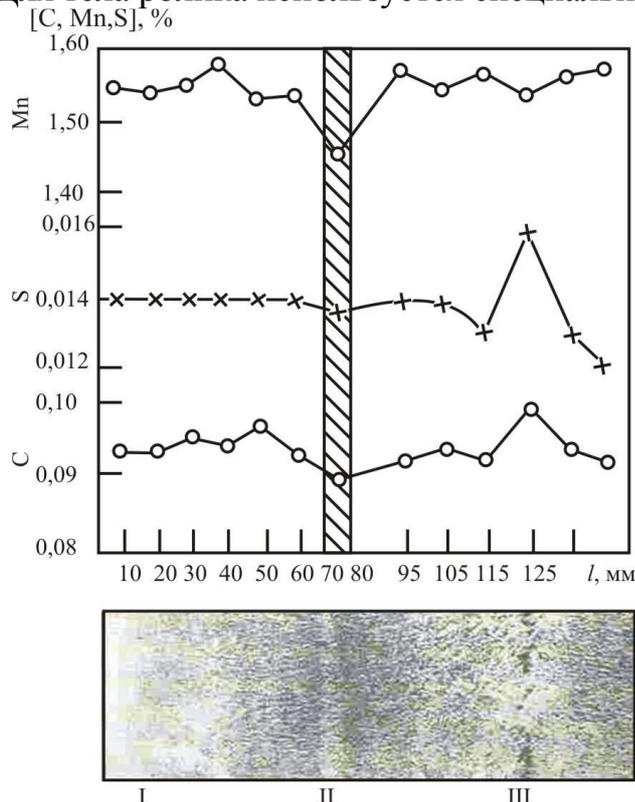


Рис. 6. Химическая неоднородность по сечению непрерывного слитка стали 32Г2Ф, отлитого с ЭМП в ролике: I-поверхность; II- зона перемешивания; III- осевая зона

### Выводы

Проведена активная дегазация стали в процессе непрерывной разливки. По результатам исследования общее количество оксидов при дегазации стали 20 и 40 уменьшилось на 80%.

Разработаны методика и устройство РЭМП металла в кристаллизаторе и по этой методике оценивали осевую рыхлость, осевую химическую неоднородность, точечную неоднородность, количество и глубину залегания подкорковых пузырей.

Установлено, что улучшаются все показатели, определяющие качество непрерывнолитых заготовок.

### Список литературы

1. Шреве Х., Газер К. Непрерывная разливка круглых заготовок на непрерывное литье стали // Тр. Международной конференции. М.: 2012, 484.
2. The 6-stand Bowcaster for round of Mannesmann – Werke A.G. / W.D. Liestman, H. Gruner, J. Sademann, H. Schrewe // 66-th Stelmaking Conference. 2003. P. 130 – 140.
3. Николаев Н.А. Исследование качества стального слитка, полученного непрерывным литьем // Непрерывная разливка стали. М., 2006. С. 49 – 61.
4. Совершенствование технологии и оборудования машин непрерывного литья заготовок / М.Я. Бровман, И.К. Марченко, Ю.Е. Кан, В.И. Иванов. Киев, 1976. 147 с.
5. Лисицкий В.В., Лучкин В.С., Кулаков В.В. и др. Дегазация стали при непрерывной разливке // Металлургия. Сталь. 2003. №4. С. 28.
6. Непрерывнолитые круглые заготовки / В.Я. Генкин, А.Г. Есацлов, М.И. Староселецкий и др. М., 2004. 143с.

7. Бират Ж.П., Шоне Ж. Электромагнитные перемешивание при непрерывной разливке заготовок блюмов и слябов // Достижения в области непрерывной разливки стали. М., 1987. С. 98-115.
8. Thinstrip direct casting machine // Iron making and Steelmaking 2010. V. 17. №6. P. 373.
9. Шифрин Н.Н., Горячев В.Т., Мазанов С.Н. Применение электромагнитного перемешивания в технологии непрерывной разливки стали // Сталь. 2005. №1. С. 17-20.
10. Tomono H/Blooms in Blossom at Wakayama // Concast Technology Bews.1986. V.25. №2, p.2.
11. Tony W.A. Caster to Give Industry Dinosaur New Lease in Life // Iron and Steelmaker. 2010. V.17. №10. p.65-66.
12. Tony W.A. New Caster Starts up at Granite City // Iron and Steelmaker. 2011. V.18. №3. p.78.
13. Tranchant J.L., Boussard, Szezeeny R. The Rotary Continuous casting of rounds at St – Saulve, France // 25-th Mechanical Working and Steel Processing Conference. 2003, October, Philodelphia. P. 128 – 140
14. Update on Horizontal Caster Start up ot NSC’s Hikari Works // Iron and Steelmaker. 2010. V. 17. №12. p.10.

#### Сведения об авторе:

*Керимов Раминь Исметбей оглы* – к.х.н., заместитель генерального директора по производству ООО «Baku Steel Company», г.Баку.

## **EXPERIENCE OF IMPLEMENTATION OF PHYSICAL METHODS IN THE TREATMENT OF ELECTROSTALS**

*Kerimov R.I.*

**Keywords:** continuously cast billets, electromagnetic mixing, flocs, degassing of liquid steel, segregation, heterogeneity, magnetic field.

**Abstract.** The article presents the results of a study of electromagnetic mixing and degassing of electric steel during continuous casting. An electric steel smelted from a mixture of metal waste and pellets obtained from Dashkesan concentrate was investigated. It has been shown that poor degassing of steel leads to the formation of such structural defects as cracks, flocs, etc. As a result of degassing of electric steel during continuous casting, the total amount of oxides decreases by about 2 times.

A prototype of a roller electromagnetic stirrer (ramp) of liquid steel in steel in a crystallizer was developed. The research results show that the flow of liquid metal arising under the influence of a ramp washes away from the two-phase zone with a portion of alloying elements. As a result of ramp, an improvement in the quality of high-grade continuous-cast billets has been achieved.

A technology to improve the quality of steel by electromagnetic outweighing liquid electric steel in the production of varietal blanks was also tested. As a result of electromagnetic mixing on the crystallized metal, an increase in the homogeneity of the distribution of alloying elements occurred; compaction of the central zone of the workpieces and significantly reduced segregation in electric steel.