

- Кулагин, С.М. Кулаков, В.А. Воскресенский и др. – Кемерово: Кузбасс, 2005. – 304 с.
4. Берлин А.Б. Сибирский металлургический институт. Дела и люди. – Новокузнецк: изд. СМИ, 1992. – 224 с.
  5. Сибирский государственный индустриальный университет: Страницы истории. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2002. – 160 с.
  6. Якову Прокопьевичу Калугину – 70 лет // Сталь. 2007. № 6. С. 12.
  7. Кафедра теплофизики и промышленной экологии СибГИУ. 75 лет в образовании и науке / СибГИУ; под. ред. М.В. Темлянцев, С.Г. Короткова, В.В. Стерлигова. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2009. – 163 с.

© 2014 г. С.Г. Коротков, Е.П. Волюнкина,  
М.В. Темляцев, Г.В. Галевский  
Поступила 17 сентября 2014 г.

УДК 669.187:621.771

*Н.А. Козырев, А.А. Уманский, Д.В. Бойков*

Сибирский государственный индустриальный университет

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РЕЛЬСОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕЛЬСОВОГО ПРОКАТА И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА**

В настоящее время проблема повышения эксплуатационной стойкости рельсов является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед металлургическими предприятиями – производителями рельсового проката. Результаты проведенных в последние годы исследований свидетельствуют, что наиболее значимое влияние на эксплуатационную стойкость рельсов оказывает загрязненность стали оксидными неметаллическими включениями [1 – 3]. При этом особая роль отводится так называемым хрупкообразующим оксидным включениям, представляющим наибольшую опасность с точки зрения образования контактно-усталостных дефектов в процессе эксплуатации рельсов.

Указанный факт также подтверждается тем, что действующей нормативной документацией, которая распространяется на производство рельсового проката из стали марок Э76Ф (категория «В»), НЭ76Ф (низкотемпературной надежности), Э90АФ (рельсов повышенной износостойкости категории ИК), предусмотренная жесткая регламентация не только общего содержания кислорода в стали, но и кислорода, связанного в хрупкообразующие оксидные включения (не более 10 ppm).

Таким образом, проблема снижения концентрации хрупкообразующих оксидных

включений в рельсовом металле является на сегодняшний день актуальной.

Концентрация оксидных включений (в том числе хрупкообразующих) в рельсах напрямую определяется общим содержанием кислорода в стали. Установлено, что выполнение вышеуказанного требования стандартов по концентрации кислорода, связанного в хрупкообразующие оксидные включения (не более 10 ppm), возможно при содержании общего кислорода на уровне не более 12 – 13 ppm. При этом действующая в настоящее время технология обеспечивает среднее содержание общего кислорода на уровне 14 ppm; порядка 20 % плавок имеют данный показатель выше требуемого уровня.

Ранее проведенными в условиях электроплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК) исследованиями [4, 5] установлено, что морфология образующихся оксидных включений в значительной степени определяется концентрацией кислорода. Так, при содержании кислорода в готовых рельсах менее 25 ppm встречаются в основном строчки хрупкообразующих алюминатов кальция ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), максимальная длина включений не превышает 10 мкм.

При концентрации кислорода на уровне 40 ppm количество хрупкоразрушенных оксидных включений заметно уменьшается, возрастает доля деформируемых силикатов ( $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ), длина которых составляет 0,12 – 0,30 мм. При дальнейшем увеличении содержания кислорода неметаллические включения представлены в основном силикатами длиной от 0,25 до 0,53 мм.

С целью определения характера и степени влияния технологических параметров производства и обработки стали на содержание общего кислорода в рельсовом прокате в условиях электросталеплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» выполнено исследование методом пассивного эксперимента. Объектом исследования явилась случайная выборка из 190 плавок рельсовой стали марки Э76Ф текущего производства.

Технология производства рельсовой стали в электросталеплавильном цехе включает в себя выплавку в дуговых сталеплавильных печах емкостью 100 т каждая с последующей внепечной обработкой на агрегатах ковш-печь (АКП) и вакууматоре камерного типа и разливку на блюмовой МНЛЗ.

Анализировали влияние следующих технологических параметров:

- содержание углерода в стали перед выпуском из печи;
- содержание кремния в стали в первой пробе на АКП;
- расход коксовой мелочи при раскислении стали на выпуске;
- расход силикомарганца при раскислении стали на выпуске;
- продолжительность продувки инертным газом при обработке на АКП;
- продолжительность обработки стали на вакууматоре.

Использовали парный регрессионный анализ. Уравнение прямой регрессии, выражающее взаимосвязь переменных, имеет общий вид

$$Y = aX + b, \quad (1)$$

где  $X$  и  $Y$  – независимая и зависимая переменная;  $a$  и  $b$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по следующим формулам:

$$a = r_{XY} \frac{S_Y}{S_X}; \quad b = \bar{Y} - a\bar{X}, \quad (2)$$

где  $r_{XY}$  – парный коэффициент корреляции между переменными;  $S_Y$ ,  $S_X$  – средние квадратичные отклонения переменных;  $\bar{Y}$ ,  $\bar{X}$  – средние арифметические значения переменных.

Парный коэффициент корреляции определяется по выражению

$$r_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{S_X S_Y}, \quad (3)$$

где  $n$  – количество наблюдений в выборке.

При нелинейной взаимосвязи между переменными в зависимости от вида нелинейной функции используют различные методы расчета коэффициентов уравнения регрессии. Для полинома второго порядка  $Y = b + a_1X + a_2X^2$  расчет коэффициентов уравнения регрессии производится путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Y_i = na + b \sum_{i=1}^n X_i + c \sum_{i=1}^n X_i^2; \\ \sum_{i=1}^n Y_i X_i = a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2 + c \sum_{i=1}^n X_i^3; \\ \sum_{i=1}^n Y_i X_i^2 = a \sum_{i=1}^n X_i^2 + b \sum_{i=1}^n X_i^3 + c \sum_{i=1}^n X_i^4. \end{cases} \quad (4)$$

Для решения приведенной системы уравнений используют метод Крамера, согласно которому

$$a = \frac{\Delta a}{\Delta}; \quad b = \frac{\Delta b}{\Delta}; \quad c = \frac{\Delta c}{\Delta}, \quad (5)$$

где  $\Delta$  – определитель системы;  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta c$  – определители, полученные путем замены соответствующего столбца на столбец свободных членов.

Проверка надежности полученных уравнений регрессии производится путем сравнения коэффициентов корреляции (детерминации) с критическими значениями (согласно табличных данных).

Надежность методики применительно к металлургическим процессам подтверждена ранее проведенными работами [6, 7].

При анализе установлено значимое влияние на содержание общего кислорода в металле продолжительности продувки металла на АКП (рис. 1) и расхода силикомарганца при раскислении стали на выпуске из печи (рис. 2).

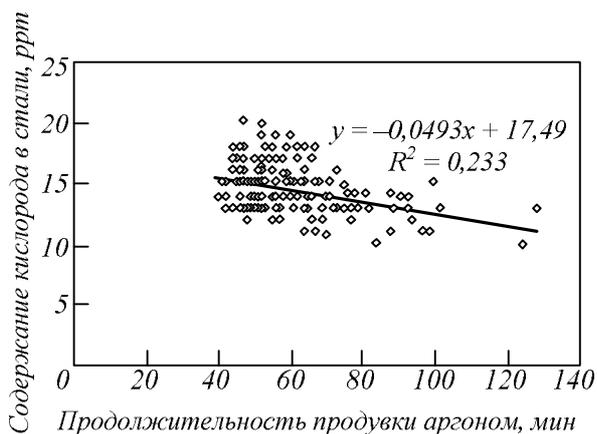


Рис. 1. Влияние продолжительности продувки аргоном на АКП на содержание кислорода в рельсовой стали

По полученным данным остальные анализируемые параметры не оказывают значимого влияния на параметр оптимизации.

При увеличении длительности продувки стали на АКП наблюдается снижение концентрации общего кислорода в металле. Поскольку общее содержание кислорода в стали складывается из растворенного в металле кислорода и кислорода, связанного в неметаллические включения, то, очевидно, полученная зависимость (рис. 1) обусловлена снижением именно количества оксидных неметаллических включений.

При продувке стали в ковше инертными газами происходит перенос неметаллических включений в жидкий шлак газовыми пузырями с последующей ассимиляцией включений шлаком. Процесс переноса включений пузырьками газа обусловлен общим свойством несмачиваемых жидкостью твердых частиц прилипать к находящимся в жидкости пузырькам газа – флотацией. При этом степень флотированности зависит от размера частиц: при увеличении размеров включений степень флотированности возрастает.

С точки зрения термодинамики процесса перехода неметаллических включений из металла в шлак лимитирующим звеном, определяющим эффективность очистки стали от включений, является стадия отрыва их от границы металл – шлак. Переход неметаллических включений с межфазной границы в шлак сопровождается повышением энергии Гиббса в системе металл – включение – шлак и поэтому является термодинамически невозможным. Однако в реальных условиях этот процесс протекает за счет действия различных факторов кинетического характера. Поэтому для повышения эффективности удаления неметалли-

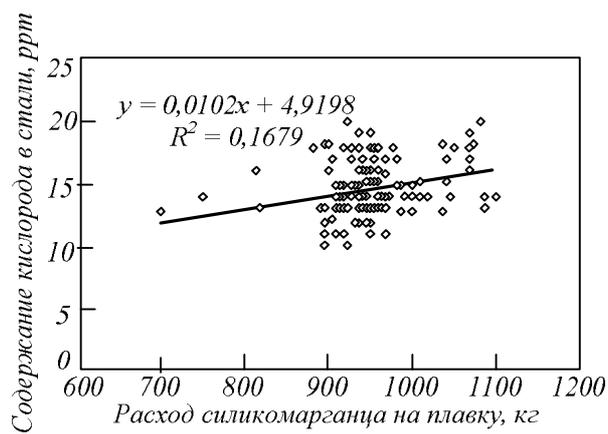


Рис. 2. Влияние расхода силикомарганца на выпуске из печи на содержание кислорода в рельсовой стали

ческих включений из стали необходимо осуществлять интенсивное обновление слоев шлака, приграничных к металлу, за счет кинетических факторов, в частности, перемешивания, продувки металла инертным газом.

Отсутствие взаимосвязи между содержанием кислорода в стали и параметрами, характеризующими окисленность расплава (содержание углерода на выпуске из печи и содержание кремния в первой ковшевой пробе на АКП) обусловлено изменением порядка присадки раскислителей (в настоящее время присадку коксовой мелочи осуществляют после присадки силикомарганца, то есть в раскисленный металл). Доказательством этого предположения является тот факт, что увеличение в процессе выпуска металла из печи количества присадок силикомарганца приводит к увеличению содержания кислорода в готовой стали (рис. 1).

Отсутствие зависимости содержания кислорода в стали от основности шлака в процессе обработки на АКП обусловлено достаточно узким интервалом изменения значений содержания кислорода.

Таким образом, в ходе исследований выявлено положительное влияние увеличения продолжительности продувки инертным газом при обработке на АКП на загрязненность стали оксидными неметаллическими включениями.

Для определения технико-экономической эффективности увеличения продолжительности продувки аргоном на АКП проведена серия из 15 опытных плавов, продолжительность которых составляла не менее 100 мин. В качестве базы для сравнительного анализа использованы 19 плавов текущего производства, проведенных в этот же период.

По полученным данным (табл. 1) увеличение средней продолжительности продувки ме-

**Сравнительный анализ показателей плавки при различной продолжительности обработки на АКП**

Показатель	Значение показателя					
	опытной плавки (15 плавки)			текущего производства (19 плавки)		
	min	max	среднее	min	max	среднее
Продолжительность продувки аргоном на АКП, мин .....	103,0	146,0	<b>122,4</b>	52,0	72,0	<b>63,0</b>
Продолжительность продувки азотом на АКП, мин .....	0	25,0	<b>5,5</b>	0	0	<b>0</b>
Суммарная продолжительность продувки на АКП, мин .....	103,0	146,0	<b>126,4</b>	52,0	72,0	<b>63,0</b>
Расход аргона на продувку:						
м <sup>3</sup> /ч .....	15,9	43,2	<b>27,9</b>	16,7	30,8	<b>26,1</b>
м <sup>3</sup> /т .....	0,27	0,72	<b>0,46</b>	0,13	0,32	<b>0,24</b>
Расход азота на продувку:						
м <sup>3</sup> /ч .....	0	38,61	<b>7,37</b>	0	0	<b>0</b>
м <sup>3</sup> /т .....	0,070	0,142	<b>0,100</b>	0	0	<b>0</b>
Температура, °С;						
в начале обработки на АКП .....	1512,0	1599,0	<b>1549,1</b>	1496,0	1611,0	<b>1545,2</b>
в конце обработки на АКП .....	1614,0	1623,0	<b>1619,5</b>	1616,0	1630,0	<b>1620,4</b>
Удельный расход электроэнергии на АКП, кВт·ч/т .....	77,10	106,00	<b>92,20</b>	55,10	73,70	<b>64,94</b>
Расход феррованадия азотированного, кг/т .....	1,32	1,50	<b>1,44</b>	1,37	1,53	<b>1,44</b>

талла на АКП с 63 до 122 мин привело к увеличению удельного расхода электроэнергии в среднем на 27,3 кВт·ч/т (с 64,9 до 92,2 кВт·ч/т стали) или на 42 %. Удельный расход аргона при этом увеличился на 0,32 м<sup>3</sup>/т (с 0,24 до 0,46 м<sup>3</sup>/т) или на 92 %.

Качество рельсового проката опытных плавки удовлетворяет требованиям Регламента и нормативной документации по следующим параметрам:

- содержанию химических элементов;
- содержанию кислорода и водорода;
- качеству макроструктуры;
- уровню механических свойств в состоянии после прокатки.

На втором этапе исследований проведена серия опытно-промышленных плавки, при раскислении которых использовали силикомарганец марки FeMnSi30HP производства ОАО «СГМК Ферросплав» взамен традицион-

но используемого силикомарганца марки MnC18. Химический состав ферросплавов согласно требований ГОСТ 4756 – 91 представлен в табл. 2.

С использованием указанного ферросплава проведено пять плавки рельсовой стали марки Э76Ф (категория Т1). Выплавку, внепечную обработку и разливку металла опытных плавки проводили в соответствии с требованиями действующей нормативной документации. Для сравнения были выбраны технологические параметры 27 плавки, выплавленных непосредственно до и после проведения опытных плавки.

По результатам проведенного промышленного эксперимента установлено следующее.

1. Среднее содержание кремния в металле опытных плавки перед обработкой на вакууматоре составило 0,319 % (0,316 % на плавках сравнения).

**Химический состав ферросплавов**

Марка	Массовая доля, %, элементов			
	Mn	Si	C	P
MnC18	более 65 до 75 включительно	более 15 до 20 включительно	не более 0,35	не более 0,03
FeMnSi30HP	более 57 до 67 включительно	более 28 до 35 включительно	не более 0,10	не более 0,20

2. Степень сквозного усвоения углерода и кремния в среднем увеличилась на 4 и 13 % соответственно, что достигнуто за счет более глубокого раскисления металла в процессе выпуска из печи, обусловленного введением большего количества кремния. Так, на выпуске металла из печи усвоение углерода возросло почти в два раза и составило 49,67 % на опытных плавках (24,60 % на плавках сравнения). Усвоение кремния увеличилось в 1,1 раза (93,60 % на опытных плавках и 88,09 % на плавках сравнения).

3. Среднее содержание алюминия в металле опытных и сравнительных плавков составило 0,0022 и 0,0029 % соответственно.

Далее с целью подтверждения полученных результатов и комплексной оценки технико-экономической эффективности использования ферросплава FeMnSi30HP проведена серия опытно-промышленных плавков, в том числе 62 плавки стали марки Э76Ф (категория Т1) и 19 плавков стали марки Э76Ф (шифр НЭ).

Оценка механических свойств и макро-структуры рельсов, полученных при использо-

вании опытной технологии, показала, что служебные характеристики металла соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685 – 2000 и ТУ 0921-118-01124328 – 2003 и находятся на уровне плавков текущего производства (табл. 3, 4).

Расчет экономической эффективности провели, исходя из фактически полученного расхода ферросплавов на опытных плавках при текущем уровне цен на ферросплавы. Расход ферросплавов при использовании опытной и существующей технологий раскисления рельсовой стали представлен в табл. 5.

Пониженный расход ферросилиция на опытных плавках получен в связи с тем, что содержание кремния в ферросплаве FeMnSi30HP выше по сравнению с содержанием его в силикомарганце MnC18. Также следует отметить, что применение незначительного (0,10 – 0,11 кг/т) количества силикомарганца марки MnC18 на опытных плавках было вызвано необходимостью корректировки массовой доли марганца в металле в процессе обработки на установке вакуумирования.

Т а б л и ц а 3

**Механические свойства горячекатаных рельсов**

Параметр	$\sigma_r$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	НВ
Средние значения на опытных плавках (категория Т1)	601,4	1085,0	11,26	17,04	326,9
Средние значения за 2012 г. (категория Т1)	628,5	1086,8	10,72	17,79	328,3
Средние значения на опытных плавках (категория НЭ)	665,0	1095,0	11,50	17,00	317,0
Средние значения за 2012 г. (категория НЭ)	691,4	1128,6	9,82	15,87	336,8
Требования ГОСТ Р 51685 – 2000	–	не менее 900	5,00	–	–

Т а б л и ц а 4

**Механические свойства термоупрочненных рельсов**

Параметр	$\sigma_r$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_s$ , %	$\Psi$ , %
Средние значения на опытных плавках (категория Т1)	942,5	1270,0	11,25	32,0
Средние значения за 2012 г. (категория Т1)	920,4	1271,3	12,60	35,8
Средние значения на опытных плавках (категория НЭ)	920,0	1270,0	11,00	30,0
Средние значения за 2012 г. (категория НЭ)	911,6	1271,3	12,80	39,4
Требования ГОСТ Р 51685 – 2000	800	не менее 1180	8	25

## Расход ферросплавов при производстве стали Э76Ф

Ферросплав	Расход ферросплавов, кг/т		Отклонение, кг/т
	опытная технология	существующая технология	
<i>категория Т1</i>			
МnC18	0,11	10,13	-10,02
ФC65	0,30	2,55	-2,25
FeMnSi30HP	12,16	0	+12,16
<i>категория НЭ</i>			
МnC18	0,10	10,28	-10,18
ФC65	0,29	2,48	-2,19
FeMnSi30HP	11,76	0	+11,76

По полученным расчетным данным экономическая эффективность от использования нового ферросплава марки FeMnSi30HP для раскисления рельсовой стали Э76Ф категории Т1 и категории НЭ составила 13,99 и 32,64 руб./т стали соответственно.

**Выводы.** В условиях электросталеплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» проведены исследования влияния технологических параметров производства рельсовой стали на содержание кислорода в расплаве. Установлено, что увеличение продолжительности продувки стали инертным газом при обработке на АКП с 63 до 122 мин способствует уменьшению количества оксидных неметаллических включений, при этом остальные контролируемые параметры качества готовых рельсов не ухудшаются. Проведен анализ технико-экономической эффективности использования новой технологии раскисления рельсовой стали с использованием силикомарганца марки FeMnSi30HP взамен МnC18. По результатам проведенного промышленного эксперимента подтверждено повышение степени сквозного усвоения углерода и кремния (на 4 и 13 % соответственно). Оценка механических свойств и макроструктуры рельсов, полученных при использовании опытной технологии, показала, что они находятся на уровне плавок текущего производства. По полученным расчетным данным экономическая эффективность от использования нового ферросплава марки FeMnSi30HP составила 13,99 и 32,64 руб./т рельсов категорий Т1 и НЭ соответственно.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дерябин А.А., Добужская А.В. Исследование эффективности процессов раскисления, модифицирования и микролегирования рельсовой стали // *Сталь*. 2000. № 11. С. 38 – 43.
2. Дерябин А.А., Рабовский В.А., Шур Е.А. Повышение требований к качеству железнодорожных рельсов в новом национальном стандарте // *Сталь*. 2000. № 11. С. 82 – 85.
3. Линчевский Б.В., Вартпатрикова С.Н., Дашевский В.Я., Кашин В.И., Макарова Н.Н. Влияние раскисления кордовой стали на природу оксидных неметаллических включений // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2002. № 5. С. 14 – 18.
4. Козырев Н.А., Протопопов Е.В., Айзатулов Р.С., Бойков Д.В. Новая технология производства рельсовой стали // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2012. № 2. С. 25 – 29.
5. Козырев Н.А., Бойков Д.В. Возможности улучшения качества рельсовой стали // *Электрометаллургия*. 2012. № 1. С. 30 – 33.
6. Кузнецов И.С., Прахов А.Е., Уманский А.А., Рубцов Ю.Т. Влияние технологических факторов на качество поверхности заготовок конструкционных сталей // *Сталь*. 2008. № 4. С. 43 – 45.
7. Айзатулов Р.С., Уманский А.А., Чернышева Н.А. Статистический анализ влияния состава металлической шихты на основные технико-экономические показатели работы электросталеплавильного цеха ОАО «НКМК» // *Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. Сборник научных трудов*. – Москва-Новокузнецк, 2009. Вып. 23. С. 39 – 46.

© 2014 г. Н.А. Козырев, А.А. Уманский,  
Д.В. Бойков  
Поступила 26 июня 2014 г.