

«сдвигаются» в поля более высокой напряженности. В переменных магнитных полях с напряженностью примерно 40 кА/м материал представляет собой отдельные разрозненные частицы. Такие поля можно считать оптимальными как для намагничивания, так и для размагничивания проб. Таким образом, параметры магнитных полей для флокуляции и дефлокуляции материала продуктов обогащения технически достижимы на обогатительной фабрике.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волгай В.Ф., Кармазин В.И., Юров П.П. // Обогащение полезных ископаемых. Научно-технический сборник. – Киев: Техника, 1968. Вып. 3. С. 19 – 25.

2. Мелик-Гайказян В.И., Емельянова Н.П., Драганов А.В. и др. – В кн.: Сб. материалов V Конгресса обогатителей стран СНГ; Т. III. М., Альтекс, 23 – 25 марта 2005 г., – М.: МИСиС, 2005. С. 299 – 301.
3. Ломовцев Л.А., Нестерова Н.А., Дробченко Л.А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. – М.: Недра, 1979. – 235 с.
4. Кармазин В.В., Кармазин В.И., Бинкевич В.А. Магнитная регенерация и сепарация при обогащении руд и углей. – М.: Недра, 1968. – 199 с.
5. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. – М.: Изд-во МГГУ, 2005. – 670 с.

© 2013 г. Э.К. Якубайлик, В.И. Килин,  
М.В. Чижик, И.М. Ганженко, С.В. Килин  
Поступила 13 июля 2012 г.

УДК 669.18.14.018.294.2

**А.Б. Юрьев<sup>1</sup>, Н.А. Козырев<sup>2</sup>, Д.В. Бойков<sup>2</sup>,  
С.В. Фейлер<sup>2</sup>, Т.П. Захарова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
<sup>2</sup> ОАО «ЕВРАЗ – Западно-Сибирский металлургический комбинат»

## ВЛИЯНИЕ ОКИСЛЕННОСТИ РАСПЛАВА НА КАЧЕСТВО РЕЛЬСОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ

**Аннотация.** Представлено описание технологии производства вакуумированной рельсовой стали с выпуском металла из печи при содержании углерода не менее 0,10 % и присадкой на выпуске в ковш углеродсодержащего материала. Внедрение технологии обеспечило существенное снижение содержания кислорода и загрязненности стали строчками хрупкоразрушенных оксидов, что позволило освоить выпуск рельсовой продукции высшей категории качества.

**Ключевые слова:** рельсовая сталь, окисленность металла, неметаллические включения, вакуумирование, углерод, кислород, качество, металлопрокат.

## IMPACT ON QUALITY OXIDIZED MELTS RAIL ELECTRIC STEEL

**Abstract.** The article describes the technology of vacuum degassed rail steel with the release of the furnace with a carbon content of at least 0.10 % and an additive in the production of carbonaceous material in the bucket. The introduction of technology has provided a significant reduction in oxygen levels and pollution have become lines brittle failure oxides, which will develop the production of rail products of the highest quality.

**Keywords:** rail steel, oxidized metals, nonmetallic inclusions, vacuum, carbon, oxygen, quality building products.

Отсутствие в технологической схеме производства металла современных агрегатов внепечной обработки стали создает значительные особенности и осложняет получение стабильных показателей качества металлопродукции. На этапе производства невакуумированной рельсовой стали в условиях ОАО «ЕВРАЗ – объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» были введены ограничения по массовой доле углерода в металле: при расплавлении не менее 0,70 %, перед выпуском полупродукта из печи не менее 0,60 % и в ковшевой пробе на агрегате ковш – печь не менее 0,50 % [1]. Такие ограничения обусловлены решением задач внепечной обработки, в том числе, успешной дегазации, гомогенизации стали по температуре и химическому составу и удалению неметаллических включений. Как известно, они связаны

с необходимостью окисления определенного количества углерода. Необходимое количество окислившегося углерода для успешной дегазации рассчитывали с использованием уравнения Геллера [2], определяющее количество газа для продувки металла вычисляли по зависимости

$$S_p = \frac{224}{M_c k_c^2 P \left( \frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_0} + C_1 - C_0 \right)}, \quad (1)$$

где  $S_p$  – количество газа для продувки, м<sup>3</sup>/т;  $M_c$  – молярная масса удаляемого газа;  $k_c$  – константа равновесия реакции растворения газа;  $P$  – давление газа над расплавом, атм;  $C_0$  и  $C_1$  – начальное и конечное содержание удаляемого газа, %.

В частности, для удаления из расплава водорода (снижения его содержания с 0,0009 до 0,0002 %), принимаем рекомендуемую константу  $\lg k_H = -(1900/T) - 1,577$  [2]. При 1600 °С  $k_H = 0,0025$ , получаем:

$$S_p = \frac{224}{2 \cdot 0,0025^2 \cdot 1 \left( \frac{1}{0,0009} - \frac{1}{0,0002} + 0,0009 - 0,0002 \right)} = 2,64 \text{ м}^3/\text{т}.$$

Для удаления из расплавленной стали азота (снижения содержания с 0,015 до 0,005 %) принимаем рекомендуемую константу  $\lg k_N = -(188/T) - 1,25$ . При 1600 °С  $k_N = 0,044$ , получаем:

$$S_p = \frac{224}{28 \cdot 0,044^2 \cdot 1 \left( \frac{1}{0,015} - \frac{1}{0,005} + 0,015 - 0,005 \right)} = 1,99 \text{ м}^3/\text{т}.$$

Например, при реализации барботажа монооксидом углерода (если принять, что окисление углерода протекает по реакции  $[C] + [O] \rightarrow \{CO\}$ , а при окислении 1 моля (0,012 кг) углерода выделяется  $22,4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> оксида углерода CO) для выплавки стали в печи емкостью 100 т для удаления водорода необходимо окислить  $264\,000 \cdot 0,012 / 22,4 = 141,4$  кг (или 0,141 %) углерода, а для удаления азота необходимо окислить  $199\,000 \cdot 0,012 / 22,4 = 106,607$  кг (или 0,106 %) углерода.

В таких условиях рациональным является обеспечение содержания углерода в пробе металла при расплавлении на 0,10 % выше верхнего предела его содержания в готовой стали, а содержание углерода при расплавлении для рельсовой стали должно быть не менее 0,92 %. Требуемое содержание углерода может быть обеспечено присадкой чугуна или кокса. При этом низкая плотность кокса не всегда позволяет получить требуемое содержание углерода при расплавлении.

Как известно [3], содержание углерода в стали по ходу окислительного периода определяет окисленность стали. Поэтому в соответствии с технологической инструкцией запрещается снижать содержание углерода менее 0,60 % с целью исключения получения высокого содержания кислорода в стали. Изучение особенностей влияния концентрации углерода [C] по ходу

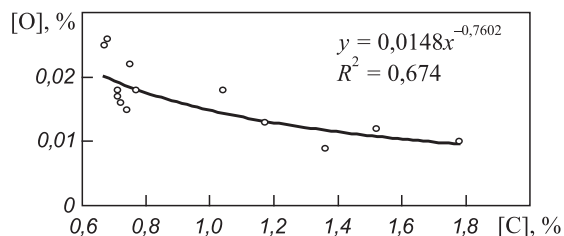


Рис. 1. Влияние концентрации углерода по ходу окислительного периода на содержание кислорода

окислительного периода при выплавке рельсовой стали НЭ76Ф на содержание кислорода [O] подтвердило известную зависимость [2] (рис. 1).

Если учесть, что раскисление стали углеродом описывается уравнением  $[C] + [O] = \{CO\}$ , а константа реакции  $k = \frac{P_{CO}}{a_C a_O} = \frac{P_{CO}}{[C] f_C [O] f_O}$ , тогда  $[O] = \frac{P_{CO}}{k [C] f_C f_O}$ . Используя рекомендуемые термодинамические данные [2] для этой реакции, получим при 1600 °С

$$\lg k = -\frac{\Delta G}{2,3RT} = \frac{-22\,400 - 39,7 \cdot 1873}{2,3 \cdot 8314 \cdot 1873} = 27\,015, \quad k = 502,9.$$

Принимая  $\lg f_C = 0,14[C]$  и  $\lg f_O = -0,45[C]$ , найдем равновесную концентрацию кислорода при содержании углерода в металле 0,7 %:

$$[O] = \frac{1}{502,9 \cdot 0,7 \cdot 1,253 \cdot 0,484} = 0,00468 \text{ \%}.$$

Тогда при концентрации углерода 0,6 % содержание кислорода в металле будет составлять 0,00508 %, а при концентрации углерода 0,5 % – 0,00568 %. Таким образом, фактически концентрация кислорода в стали по ходу окислительного периода значительно выше значений, равновесных с концентрацией углерода.

Однако введение указанных выше ограничений влечет за собой увеличение продолжительности плавки, расхода электроэнергии и не исключает переназначения запланированной марки стали из-за несоответствия содержания углерода требованиям нормативной документации.

При использовании современных средств внепечной обработки стали (агрегата ковш – печь и ковшевого вакуумирования) возможно обеспечение технологии с выпуском металла из печи с пониженным содержанием углерода. При этом принципиальным вопросом является обеспечение оптимальных значений содержания углерода, ниже уровня которого не могут быть обеспечены требуемые эксплуатационные механические свойства железнодорожных рельсов.

Выполненные металлографические исследования показывают, что содержание кислорода в металле влияет на изменение длины  $l$  строчки неметаллических включений (рис. 2).

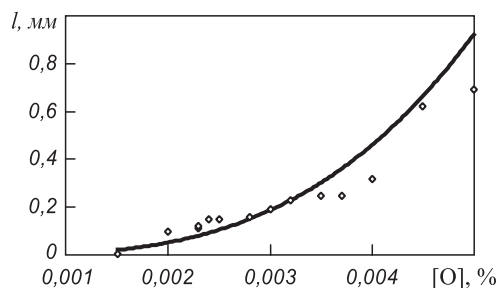


Рис. 2. Изменение длины строчки неметаллических включений от содержания кислорода

Определено, что при содержании кислорода в готовых рельсах менее 25 ppm встречаются в основном строчки хрупкоразрушенных алюминатов кальция ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ). Максимальная длина включений при таком содержании кислорода не превышает 10 мкм, а уровень загрязненности стали алюминатами кальция оценивается в среднем баллом не более 1 по шкале ГОСТ 1778 – 70. Несмотря на исключение из технологии раскисления материалов, содержащих алюминий, частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в строчках неметаллических включений присутствуют в связи с применением ферросплавов, содержащих более 1 % алюминия. С повышением содержания кислорода до 40 ppm заметно изменяется характер и количество неметаллических включений. Количество хрупкоразрушенных оксидных включений уменьшается, возрастает доля деформируемых силикатов ( $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ). В составе силикатных включений встречаются алюминий и кальций. Силикатные включения наблюдаются на шлифах в виде тонких равномерно распределенных строчек темно-серого цвета длиной от 0,12 до 0,30 мм. При более высоком содержании кислорода неметаллические включения представлены в основном силикатами длиной от 0,25 до 0,53 мм. Степень загрязненности стали такими включениями в среднем соответствует баллу 2. Считается, что мелкие пластичные силикаты по сравнению с хрупкоразрушенными оксидными включениями в меньшей степени влияют на стойкость рельсов при эксплуатации, и в связи с этим оксиды алюминия, заключенные в пластичную силикатную оболочку, вероятно, будут являться наиболее безопасным видом включений. Независимо от содержания кислорода наряду с эндогенными включениями в рельсовой стали могут встречаться единичные включения экзогенного характера. Длина таких включений достигает 1,5 мм. Такие включения имеют многофазный состав и являются в основном частицами шлака и огнеупоров или шлакообразующей смеси, подаваемой в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок.

В зависимости от состава многофазные шлаковые включения проявляют неодинаковую деформируемость при прокатке. Одни включения, в состав которых входят оксиды марганца, кремния, алюминия, кальция, серы ( $[\text{Mn}] > [\text{Si}] > [\text{Al}] > [\text{Ca}] > [\text{S}]$ ), пластически деформируются при прокатке, образуя грубые строчки с острыми или расщепленными концами. Включения, состоящие из оксидов кальция, кремния, марганца, алюминия, титана, магния, калия, серы ( $[\text{Ca}] > [\text{Si}] > [\text{Mn}] > [\text{Al}] > [\text{Ti}] > [\text{Mg}] > [\text{K}] > [\text{S}]$ ), не деформируются и образуют волнистую строчку. Дальнейшие исследования показали, что достижение цели снижения содержания кислорода в стали приводит к заметному уменьшению количества деформируемых силикатных включений и увеличению доли хрупкоразрушенных сложных оксидов.

Как показали полигонные испытания опытных партий рельсов на экспериментальном кольце ВНИИЖТ,

эксплуатационная стойкость рельсов, отличающихся повышенной долей силикатов, оказалась выше по сравнению со стойкостью рельсов из вакуумированной стали, отличающихся существенно меньшим количеством силикатов и большим количеством алюминатов кальция [4]. Это свидетельствует о том, что эксплуатационная стойкость рельсов определяется не только содержанием кислорода в стали, а предопределена типом неметаллических включений. Данный тезис подтверждается рекомендациями ВНИИЖТ и ИМЕТ РАН им. Байкова, в которых говорится, что для исключения хрупкоразрушенных оксидных включений, представляющих наибольшую опасность с точки зрения образования контактно-усталостных дефектов в процессе эксплуатации рельсов, содержание кислорода не должно превышать 10 ppm.

Для подтверждения этого предположения были проведены эксперименты с получением полупродукта для производства рельсовой стали марок Э76Ф (категория Т1 по ГОСТ Р 51685) и НЭ76Ф (низкотемпературной надежности по ТУ 0921-118-01124328 – 2001) без регламентации содержания углерода в металле по расплавлению. Как установлено, при раскислении металла в процессе выпуска из печи силикомарганцем и при науглероживании коксовой мелочью (с влажностью до 2 %) с последующей добавкой углеродсодержащего материала на агрегате ковш – печь при суммарной массе науглероживателя более 600 кг содержание водорода превышает 4,0 ppm при требовании до 2,0 ppm.

Разработанная технология обработки рельсовой стали на вакууматоре [5] позволила снизить содержание водорода в сталях Э76Ф и НЭ76Ф после обработки в течение 19 – 20 мин до уровня 0,9 – 1,2 ppm. При этом появилась практическая возможность оптимизации технологии в части регламентируемых значений массовой доли углерода перед выпуском металла из дуговой сталеплавильной печи. Первоначально проведенные опыты по выплавке полупродукта для производства рельсовой стали с пониженным до 0,30 % содержанием углерода перед выпуском плавки из печи показали, что химический состав опытного металла, загрязненность неметаллическими включениями и механические свойства рельсов в нетермообработанном и термообработанном состояниях находятся на уровне текущего производства и обеспечивают требования стандартов (ГОСТ Р 51685, ТУ 0921-118-01124328 – 2003). Указанная технология внедрена в производство в 2010 г. Содержание кислорода в сталях Э76Ф и НЭ76Ф составляло в среднем 18,9 и 15,4 ppm соответственно, длина строчки хрупкоразрушенных оксидных включений при выплавке стали по указанной технологии составила 0,070 и 0,050 мм соответственно (табл. 1 и 2).

Полученные результаты позволили сделать вывод о возможности снижения содержания кислорода за счет связывания активного кислорода углеродом науглерожи-

Таблица 1

**Химический состав рельсовой стали (среднее содержание элементов)**

Период	Содержание элемента, % (по массе)											O, ppm	H, ppm
	C	Mn	Si	V	P	S	Al	Cr	Ni	Cu	N		
<b>НЭ76Ф по ТУ 0921-118-01124328 – 2003</b>													
2010 г.	0,76	0,88	0,31	0,07	0,014	0,008	0,003	0,08	0,07	0,12	0,014	15,3	0,89
2011 г.	0,76	0,89	0,31	0,07	0,013	0,007	0,002	0,08	0,08	0,13	0,014	14,1	1,08
2012 г. (I – IV)	0,78	0,91	0,32	0,07	0,013	0,007	0,003	0,09	0,08	0,13	0,012	14,3	1,10
<b>Э76Ф (категория Т1) ГОСТ P51685 – 2000</b>													
2010 г.	0,76	0,88	0,31	0,04	0,014	0,008	0,003	0,08	0,07	0,12	Н.о.	18,9	0,92
2011 г.	0,76	0,88	0,31	0,04	0,015	0,007	0,002	0,09	0,08	0,13	Н.о.	16,8	1,14
2012 г. (I – IV)	0,77	0,89	0,31	0,04	0,014	0,007	0,002	0,08	0,08	0,13	Н.о.	14,8	1,18
<b>Э76Ф (категория В) ГОСТ P51685 – 2000</b>													
2011 г. (IX – XII)	0,79	0,92	0,33	0,07	0,013	0,008	0,002	0,08	0,08	0,12	0,011	14,3	1,18
2012 г. (I – III)	0,79	0,93	0,32	0,07	0,013	0,007	0,002	0,08	0,08	0,13	0,01	13,7	1,13

Примечание. Н.о. – не определяется.

Таблица 2

**Механические характеристики и загрязненность металлопроката рельсовой стали неметаллическими включениями (средние значения)**

Период	Значения показателей для нетермоупрочненных рельсов			Длина строчек неметаллических включений (хрупко-разрушенные оксиды), мм	Значения показателей для объемнозакаленных рельсов											
	Величина прогиба при копровых испытаниях, мм	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %		Величина прогиба при копровых испытаниях, мм	$\sigma_{огт}$ , мм	Твердость НВ по сечению рельса				ККУ <sub>+200С</sub> (Т1), ККУ <sub>-600С</sub> (НЭ), Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	
							поверхности катания	10 мм	22 мм	шейки						подошвы
<b>НЭ76Ф по ТУ 0921-118-01124328 – 2003</b>																
2010 г.	24	1119	10,2	0,050	21,9	1,6	375	371	351	361	371	32,0	1263	911	12,8	40,3
2011 г.	24	1120	10,3	0,017	22,0	1,6	380	376	355	366	374	32,7	1257	907	13,2	40,6
2012 г. (I – IV)	24	1130	9,9	0,008	22	1,6	381	377	356	367	373	32,0	1271	910	12,8	39,4
<b>Э76Ф (категория Т1) ГОСТ P51685 – 2000</b>																
2010 г.	24	1077	10,2	0,070	9,4	1,6	374	371	351	360	372	38,8	1257	905	12,3	37,3
2011 г.	25	1082	10,6	0,018	9,6	1,7	379	374	354	364	374	39,8	1251	902	12,4	36,1
<b>Э76Ф (категория В) ГОСТ P51685 – 2000</b>																
2012 г. (I – IV)	25	1088	10,6	0,015	9,6	1,6	378	374	354	364	371	37,5	1272	919	12,6	35,7
2011 г. (IX – XII)	25	1132	9,2	0,003	11,0	1,6	388	384	362	374	382	42,8	1308	934	12,8	39,4
2012 г. (I – IV)	25	1139	10,3	0,010	10,8	1,5	385	381	361	371	377	41,0	1303	932	12,9	39,1

Примечание. Неметаллические включения глинозем и глинозем, сцементированный силикатами, не обнаружены.

вателя (коксовой мелочи) в процессе выпуска металла из дуговой сталеплавильной печи с образованием газовой фазы. С этой целью в электросталеплавильном цехе были проведены опытные плавки рельсовой стали марок Э76Ф и НЭ76Ф с содержанием углерода в полупродукте не менее 0,10 % и обязательной присадкой в ковш в начале выпуска просушенной коксовой мелочи. Присадку коксовой мелочи производили при помощи конвейера.

Основные технико-экономические показатели опытных плавок представлены в табл. 3.

Приведенные данные показывают, что основные технико-экономические показатели (расход электроэнергии и длительность плавки) при использовании опытной технологии улучшаются. Качественные характеристики металлопроката представлены в табл. 1. Показатели качества отвечают требованиям стандартов

Т а б л и ц а 3

## Технико-экономические показатели опытных плавков и плавков сравнения

Показатель	Значение показателя для плавки	
	опытной	сравнения
Продолжительность плавки от выпуска до выпуска за вычетом простоев, мин	61,0	61,7
Продолжительность плавки «под током», мин	45,4	47,4
Удельный расход электроэнергии, кВт·час/т жидкой стали	432	433
Удельный расход твердого чугуна, кг/т жидкой стали	350	348
Удельный расход кислорода, м <sup>3</sup> /т жидкой стали	40,32	33,51
Расход извести, кг/т жидкой стали	51,04	49,17

(ГОСТ Р 51685, ТУ 0921-118-01124328 – 2003): загрязненность неметаллическими включениями ниже, а механические свойства рельсового проката как в состоянии прокатки, так и после проведения термической обработки выше уровня текущего производства. Содержание кислорода составило в среднем 15,6 ppm и отвечает требованиям для рельсового металла высшей категории качества (категории «В»). Данная технология позволила освоить выпуск рельсовой стали для производства рельсов высшей категории качества.

Таким образом, разработана защищенная патентами [6, 7] технология производства вакуумируемой рельсовой стали с выпуском металла из печи с пониженным (не менее 0,10 %) содержанием углерода. Такая технология обеспечивает низкий уровень содержания кисло-

рода и отсутствие флокенов в готовых рельсах, снижает загрязненность стали по строчкам хрупкоразрушенных оксидов и повышает ударную вязкость.

**Выводы.** Разработана технология производства вакуумированной рельсовой стали с выпуском металла из печи при содержании углерода не менее 0,10 % и присадкой на выпуске в ковш углеродсодержащего материала. Внедрение технологии обеспечило существенное снижение содержания кислорода и загрязненности стали строчками хрупкоразрушенных оксидов, что позволило освоить выпуск рельсовой продукции высшей категории качества.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Железнодорожные рельсы из электростали / Н.А. Козырев, В.В. Павлов, Л.А. Годик, В.П. Дементьев – Новокузнецк: Новокузнецкий полиграфкомбинат, 2006. – 388 с.
2. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. – М.: Metallurgy, 1987. – 255 с.
3. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали. – М.: «Мир», ООО «Издательство АСТ», 2003. – 528 с.
4. Козырев Н.А., Бойков Д.В. // Электрометаллургия. 2012. № 1. С. 30 – 33.
5. Юрьев А.Б., Годик Л.А., Козырев Н.А. и др. // Сталь. 2009. № 2. С. 30, 31.
6. Пат. 2415180 РФ. Способ производства рельсовой стали / И.В. Александров, Н.А. Козырев, Е.П. Кузнецов и др., ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат». Заявл. 25.11.2009. Оpubл. 27.03.2011.
7. Пат. 2425154 РФ. Способ рафинирования рельсовой стали в печь-ковше / Г.В. Мохов, И.В. Александров, Н.А. Козырев и др., ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат». Заявл. 25.01.2010. Оpubл. 27.07.2011.

© 2013 г. А.Б. Юрьев, Н.А. Козырев,  
Д.В. Бойков, С.В. Фейлер, Т.П. Захарова  
Поступила 29 января 2013 г.