

УДК 669.14.018.29:625.143.2

А.С. РУДЮК, канд. техн. наук, заместитель генерального директора,

Е.А. ЧИЧКАРЕВ, докт. техн. наук, старший научный сотрудник, Д.В. ТЕРЗИ, инженер

Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь» (ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА РЕЛЬСОВОГО МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ КОНВЕРТЕРНОГО ЦЕХА ПАО «МК «АЗОВСТАЛЬ»

Представлены основные элементы технологии раскисления рельсовой стали в конвертерном цехе ПАО «МК «Азовсталь». Проанализировано изменение равновесной со шлаком активности кислорода при внепечной обработке рельсовой стали. Показано заметное влияние массовой доли кальция в стали на активность кислорода по завершении внепечной обработки, установлены рациональные пределы ее варьирования и целесообразность двустадийной обработки кальцием. Показано снижение уровня загрязненности неметаллическими включениями рельсов из конвертерной стали по сравнению с рельсами из мартеновской стали.

Ключевые слова: сталь, внепечная обработка, науглероживание, раскисление, неметаллические включения, активность кислорода.

Наличие в рельсовой стали недеформируемых неметаллических включений (НВ) глинозема и отчасти твердых алюминатов ускоряет образование контактно-усталостных дефектов в рельсах в процессе эксплуатации [1, 2]. Для уменьшения вредного влияния оксидных включений на металлургическое качество рельсов необходимо предотвращать попадание алюминия в сталь и использовать различные методы модифицирования НВ [3, 4].

Как показал опыт разработки технологии выплавки и внепечной обработки рельсовой стали в условиях конвертерного цеха ПАО «МК «Азовсталь», для управления процессом раскисления и контроля загрязненности рельсовой стали оксидными НВ может использоваться показатель активности кислорода, растворенного в стали, измеренный на различных стадиях внепечной обработки.

Рельсовую сталь марок К76Ф или К76ФБ выплавляли в 350-тонном кислородном конвертере с передувом. Химический состав чугуна характеризовался следующими средними значениями (2013 г.), %: С – 4,6; Si – 0,63; Mn – 0,23; P – 0,066; S – 0,027. Продувку начинали, когда фурма находилась на максимальном расстоянии от спокойной ванны. Кислород (чистотой не ниже 99,5 % с содержанием азота не более 0,1 %) подавался через пятисопловую водоохлаждаемую фурму. На выпуске из конвертера в металл присаживались науглероживатель, ферросплавы, твердая шлакообразующая смесь или известь, после чего металл подвергали внепечной обработке. Продувку заканчивали при содержании углерода

0,04–0,12 %. Распределение плавов по содержанию углерода на выпуске показано на рис. 1.

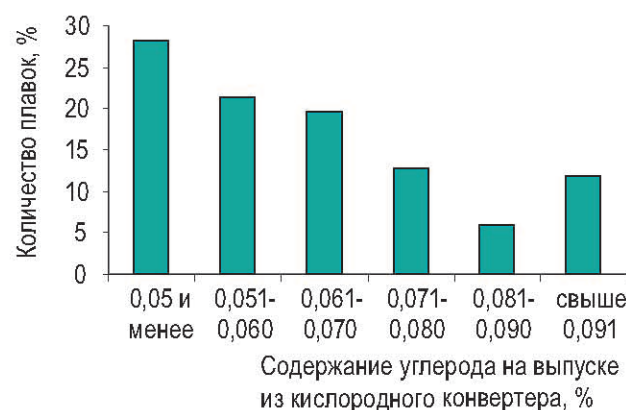


Рисунок 1 – Распределение плавов по содержанию углерода металла на выпуске из конвертера

Температура на выпуске из конвертера находилась в пределах 1660–1690 °С. Продувка длилась в среднем 14 мин, додувка для корректировки температуры – 2–4 мин. Среднее содержание железа в шлаке составило около 15 %, а среднее значение основности шлака – 2,4–3,0 % (данные за 2013 г.).

Отработана технология комплексного науглероживания полупродукта конвертерной плавки жидким чугуном (из расчета присадки 0,5–0,55 % масс. углерода) и твердыми углеродсодержащими материалами (из расчета присадки 0,2–0,25 % масс. углерода), при этом массовая доля фосфора в готовой стали не превышала 0,015 %.



Расчетная равновесная активность кислорода в раскисленной кремнием и марганцем рельсовой стали (около 0,8 % С) составила менее 25–30 ppm, что соответствует результатам прямых измерений датчиками Celox.

Расход кремний- и марганецсодержащих сплавов (ферросиликомарганца, при необходимости – ферросилиция) выбрали таким, чтобы достигалась массовая доля марганца, близкая к среднемарочной, и формировались жидкие включения силикатов марганца.

Нагрев металла на установке ковш-печь (УКП) осуществляли до температуры в пределах 1530–1585 °С. Микролегирование и модифицирование стали производили феррованадием (FeV) для марки стали К76Ф или феррованадием и феррониобием (FeNb) для марки К76ФБ по окончании последнего цикла нагрева.

В условиях ПАО «МК «Азовсталь» рельсовую сталь вакуумированию не подвергали в связи с наличием на предприятии оборудования для противодокенной обработки горячекатаных рельсов.

Окончательное раскисление плавки осуществлялось на УКП присадками силикокальция, а раскисление ковшевого шлака – твердым углеродсодержащим материалом и гранулированным алюминием или карбидом кальция. Степень раскисления контролировали по уровню активности кислорода и массовой доле кальция.

Как показал анализ диаграммы изоактивностей бинарной системы CaO–SiO₂ [5], даже для насыщенной двукальциевым силикатом шлаковой фазы (активность SiO₂ около 0,04) расчетная активность растворенного кислорода превышает 20 ppm (при температуре 1600 °С).

Так как чисто силикатные шлаки обладают высокой вязкостью, предпочтительными для внепечной обработки рельсовой стали являются шлаки CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO с низкой активностью Al₂O₃. Результаты расчета активности растворенного в стали кислорода, равновесного со шлаком различной основности, представлены на рис. 2.

Активность SiO₂ и Al₂O₃ рассчитывалась по модели [6]. Как видно из рисунка, равновесная активность кислорода $a_{[O]}$ на уровне 10 ppm (при температуре 1600 °С) достигается лишь при низкой основности шлаковой фазы (около 30 % SiO₂). По мере увеличения основности величина $a_{[O]}$ снижается, однако снижение активности кислорода до уровня менее 3,5 ppm (при температуре 1550 °С) нежелательно вследствие возможного восстановления алюминия и формирования хрупких алюминатов кальция.

Наилучшие результаты по величине активности растворенного кислорода обеспечила технология диффузионного раскисления. В данном варианте технологии раскисление ковшевого шлака при доводке производится гранулированным алюминием, присаживаемым на шлак

(две–четыре порции по 50–70 кг) в процессе нагрева и десульфурации стали.

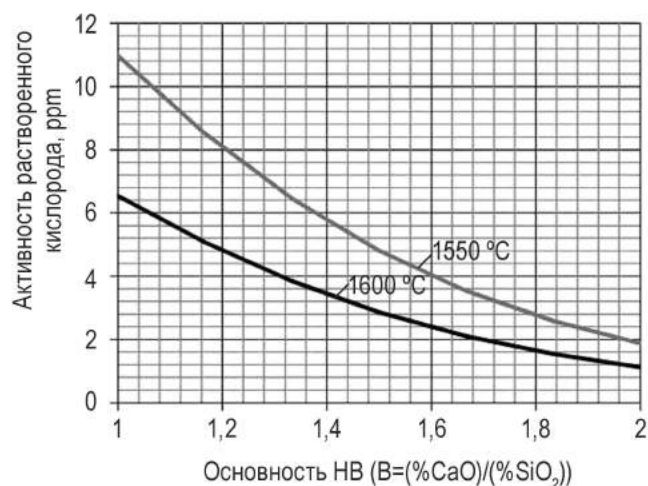


Рисунок 2 – Расчетная активность растворенного кислорода в рельсовой стали:

раскисление кремнием Si = 0,3 % масс., равновесие со шлаком CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO

Массовая доля алюминия в верхних слоях металла не превышала 0,01 % с последующим снижением (по мере перемешивания содержимого ковша и вакуумирования) до 0,005 %. Результаты промышленного эксперимента, показывающего динамику активности растворенного кислорода с ростом массовой доли кальция в металле, представлены на рис. 3.

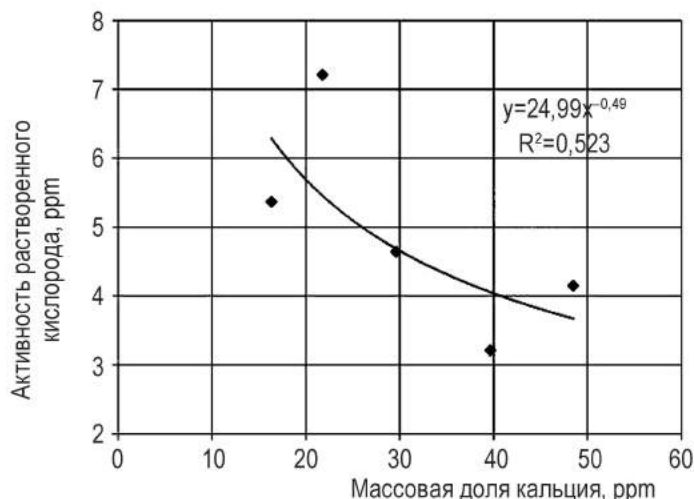


Рисунок 3 – Результаты промышленного эксперимента по исследованию влияния массовой доли кальция на активность кислорода в рельсовой стали по завершении внепечной обработки

При внепечной обработке рельсовой стали без вакуумирования кальция присаживался одной (0,35–0,40 кг/т)

или двумя порциями (при необходимости дополнительного раскисления плавки до $a_{[O]} < 10$ ppm или корректировки массовой доли кальция). Контроль активности кислорода в стали показал, что по мере раскисления шлака она снижается до 8–10 ppm, а после обработки кальцием – до 4–6 ppm и менее.

При выплавке с вакуумированием массовая доля кальция в процессе внепечной обработки существенно изменялась. По завершении нагрева и обработки кальцием (суммарный расход – 0,27 кг/т стали) на УКП его массовая доля варьировалась в пределах 0,004–0,007 % масс. После вакуумирования она составляла менее 0,0015 % масс., затем после дополнительной присадки кальция (0,13 кг/т) увеличивалась до 0,0025–0,0030 % масс., при этом активность растворенного кислорода была заметно меньше по сравнению с обработкой без вакуумирования и на большинстве проконтролированных плавков не превышала 4 ppm.

После окончания внепечной обработки стали зеркало металла в сталеразливочном ковше утепляли теплоизолирующей смесью. Разливку рельсовой стали осуществляли сифонным способом в изложницы с избыточными надставками.

Технология выплавки и внепечной обработки в кислородно-конвертерном цехе обеспечила получение рельсовой стали со стабильным химическим составом, колеблющимся в более узких пределах по сравнению с указанными в стандарте [7]; фактическое содержание кислорода и водорода находилось в пределах 4,1–11,1 ppm и 2,3–4,1 ppm соответственно.

Исследование загрязненности рельсов из конвертерной стали К76Ф неметаллическими включениями показало, что по длине строчек нитридов рельсы отвечали требованиям высшей категории [7], при этом длина строчек не превышала 0,5 мм (при допустимом значении 1 мм). Длина строчек хрупкоразрушенных оксидов (алюминатов, силикатов, шпинелей и др.) в рельсах из конвертерной стали марки К76Ф в 60 % случаев отвечала требованиям высшей категории (≤ 1 мм), а в 40 % случаев – первой категории (≤ 4 мм). Следует отметить, что длина строчек хрупкоразрушенных оксидов в рельсах из конвертерной стали практически вдвое меньше, чем в рельсах из мартеновской стали (табл. 1).

Таблица 1 – Загрязненность рельсовой стали хрупкоразрушенными оксидами

Марка стали	Средняя длина строчек хрупкоразрушенных оксидов, мм	
	в головных рельсах	в донных рельсах
К76Ф	0,59	0,55
М76Т	1,15	0,95

Механические свойства термоупрочненных рельсов полностью удовлетворяли требованиям категории 1 стандарта [7].

Установочная партия рельсов из кислородно-конвертерной стали была подвергнута квалификационным испытаниям, включавшим лабораторные испытания в условиях ПАО «МК «Азовсталь» и стендовые испытания на усталость в ОАО «ВНИИЖТ» (г. Москва). Их результаты показали, что разработанная технология обеспечивает соответствие свойств рельсов требованиям отечественного стандарта [7] и российским нормам [8].

Исследования микроструктуры металла готовых рельсов из стали марки К76ФБ показали, что размер неметаллических включений удовлетворяет требованиям ($\leq 1,0$), предъявляемым к рельсам высшей категории: длины строчек глинозема и нитридов, а также хрупкоразрушенных сложных оксидов ванадия находились соответственно в пределах 0,035–0,60 и 0,13–0,84 [9].

Уменьшение загрязненности рельсовой стали неметаллическими включениями повышает металлургическое качество рельсов и приводит к существенному снижению количества бракованных рельсов типа Р65. Кроме того, замедление процесса образования контактно-усталостных дефектов в процессе эксплуатации рельсов из конвертерной стали продлит срок их службы, а следовательно, уменьшит потребность в сырьевых и финансовых ресурсах на производство рельсов.

ВЫВОДЫ

1. В условиях конвертерного цеха ПАО «МК «Азовсталь» разработана технология выплавки и внепечной обработки конвертерной рельсовой стали марки К76Ф и освоено промышленное производство термоупрочненных железнодорожных рельсов типа Р65 из этой стали.

2. Предложена технология комплексного науглероживания низкоуглеродистого полупродукта жидким чугуном и твердым науглероживателем, обеспечивающая массовую долю фосфора в стали на уровне не более 0,015 % масс.

3. Управление процессом раскисления и науглероживания металла позволило обеспечить увеличение выхода годного на 0,7 %, уменьшение выбросов газов CO и CO₂ на 1,5 % и сокращение энергозатрат вследствие снижения времени нагрева на УКП.

4. Установлено, что снижение балла загрязненности готовых рельсов оксидными включениями достигается при формировании включений оптимального состава за счет обработки кальцием в две стадии с контролем необходимости дополнительной обработки по уровню активности растворенного кислорода.



5. При внепечной обработке рельсовой стали корректирующая обработка кальцием необходима, если активность растворенного в стали кислорода превышает 10 ppm.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Дерябин А. А.** Улучшение качества рельсов из стали, раскисляемой алюминием / А. А. Дерябин, В. В. Могильный, А. Б. Добужская // *Сталь*. – 1997. – № 7. – С. 50–55.
2. **Рейхарт В. А.** Контактно-усталостная стойкость опытных рельсов производства ОАО «КМК» / В. А. Рейхарт // *Сборник трудов юбилейной рельсовой комиссии ОАО «КМК»*. – Новокузнецк : ОАО «Новокузнецкий полиграфкомбинат», 2002. – С. 35–42.
3. **Гарбер А. К.** Анализ термодинамики процессов раскисления и оптимизация технологии внепечной обработки рельсовой стали : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / А. К. Гарбер. – М. : Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, 2009. – 26 с.
4. **Григорович К. В.** Применение фракционного газового анализа для оценки эксплуатационных свойств рельсовой стали / К. В. Григорович, А. М. Арсенкин, С. С. Шибяев // *Сборник докладов по материалам Рельсовой комиссии 2004 г.* – Магнитогорск, 2004. – С. 94–107.
5. *Атлас шлаков : справ. изд.* – М. : *Металлургия*, 1985. – 208 с.
6. **Ohta H.** Activities of SiO_2 and Al_2O_3 and activity coefficients of Fe_2O and MnO in $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ slags / H. Ohta, H. Suito // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 1998. – Vol. 29B. – P. 119–129.
7. **ДСТУ 4344:2004** Рельсы обычные для железных дорог широкой колеи. Общие технические условия. – К. : Госпотребстандарт Украины, 2005.
8. Номенклатура объектов железнодорожного транспорта, подлежащих обязательной сертификации в Российской Федерации. Элементы верхнего строения пути. Нормы безопасности. НБ ЖТ ТМ-01-98. Приложение к постановлению правительства РФ № 982 от 01.12.2009 г.
9. Технологическое сопровождение производства рельсов типа Р65 из стали марки К76ФБ, термоупрочненных по поверхности катания : отчет о НИР / ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» ; рук. Лебедев А.Д. – Х., 2013. – 34 с. – № ГР 0113U001803.

Поступила в редакцию 16.06.2014

Надано основні елементи технології розкислення рейкової сталі в конвертерному цеху ПАТ «МК «Азовсталь». Проаналізовано зміну рівноважної зі шлаком активності кисню під час позапечної обробки рейкової сталі. Показано вплив масової частки кальцію в сталі на активність кисню після завершення позапечної обробки, встановлено раціональні межі її варіювання і доцільність двостадійної обробки кальцієм. Показано зниження рівня забрудненості неметалевими включеннями рейок з конвертерної сталі порівняно з рейками з мартенівської сталі.

Basic elements of deoxidizing technology of rail steel in the converter shop of PJSC "Iron & Steel Works, "Azovstal" are given. Change of oxygen activity equilibrium with slag during out-of-furnace rail steel processing is analyzed. It is shown appreciable influence of mass fraction of calcium in steel upon oxygen activity at the end of out-of-furnace processing; it is set rational limits of its variation and reasonability of two-step treatment with calcium. It is shown reduction of pollution level by non-metallic inclusions of converter steel rails in comparison with rails from open-hearth steel.