

УДК 669.18.046.517-982

**Н.А. Козырев, Е.В. Протопопов,  
Р.С. Айзатулов, Д.В. Бойков**

Сибирский государственный индустриальный университет

## НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ

К числу важнейших критериев при оценке качества рельсовой стали относится уровень содержания водорода в жидком металле, определяющий порог флокочувствительности стали, а также уровень содержания кислорода в готовом металлопрокате, определяющий загрязненность стали неметаллическими включениями.

Первоначально [1], на этапе производства рельсов из электростали без вакуумирования в условиях ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» для обеспечения необходимых требований по содержанию водорода был разработан ряд мероприятий, ограничивающих поступление водорода в металл, изучены возможные источники его поступления. Было установлено, что существенное влияние на прирост содержания водорода по ходу внепечной обработки на агрегате ковш-печь (АКП) оказывает количество коксового порошка (коксовой пыли установок сухого тушения кокса), присаживаемого для корректировки химического состава по содержанию углерода, а следовательно, и содержания углерода в стали перед выпуском металла из печи и в первой ковшевой пробе на АКП (рис. 1). Характер зависимости объясняется значением массовой доли углерода в первой ковшевой пробе металла на АКП.

Полученная на основе экспериментальных данных зависимость содержания водорода от массовой доли углерода в первой ковшевой пробе представлена на рис. 2.

В соответствии с выявленными закономерностями в технологию производства рельсовой стали введено ограничение по массовой доле углерода в металле по расплавлению (не менее 0,70 %), перед выпуском полупродукта из печи (не менее 0,60 %) и в первой ковшевой пробе на АКП (не менее 0,50 %). Регламентация

указанных значений позволила существенным образом снизить поступление водорода в металл и получать сталь для производства рельсового металлопроката без ограничений по сортаменту и профилю рельсов. Однако введение таких ограничений повлекло увеличение продолжительности плавки, расхода электроэнергии. Не исключается возможность переназначения запланированной марки стали вследствие несоответствия содержания углерода требованиям нормативной документации.

В дальнейшем с вводом в эксплуатацию вакууматора камерного типа возможности по совершенствованию и оптимизации технологии выплавки рельсовой стали существенно расширились, в том числе по исключению недостатков, связанных с ограничением массовой доли углерода. Проведены эксперименты по выплавке полупродукта для производства рельсовой стали марок Э76Ф (категория Т1 по ГОСТ Р 51685 – 2000) и НЭ76Ф (низкотемпературной надежности по ТУ 0921-118-01124328 – 2001) с пониженным содержанием углерода перед выпуском из печи, при этом содержание углерода в металле по расплавлению не регламентировалось. В начале выпуска металла из печи до присадки ферросплавов и шлакообразующих в ковш присаживали коксовую мелочь (влажностью до 2 %) в количестве 180 – 410 кг/плавку в зависимости от содержания углерода в металле перед выпуском. Присадку 180 кг материала коксовых отсевов производили на днище ковша и в дальнейшем по необходимости – в процессе выпуска. Раскисление металла в процессе выпуска из печи проводили присадкой силикомарганца из расчета получения содержания марганца в первой ковшевой пробе 0,60 – 0,70 %. При проведении опытных плавки на АКП производили измерение содержания водорода, которое составило в

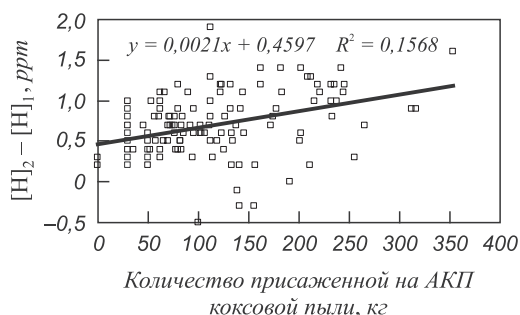


Рис. 1. Зависимость прироста содержания водорода в стали от количества коксовой пыли УСТК

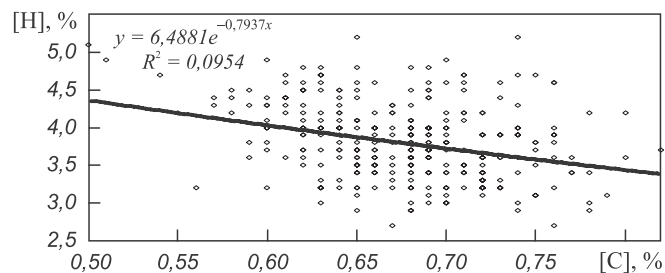


Рис. 2. Зависимость содержания водорода от содержания углерода в первой ковшевой пробе

среднем 4,0 ppm, колебалось в диапазоне 3,4 – 4,8 ppm и возрастало с увеличением суммарной массы углеродсодержащих материалов, присаживаемых на выпуске и введенных при обработке на АКП. При суммарной массе науглероживателя более 600 кг содержание водорода превышало 4,0 ppm, что делало невозможным назначение рельсовой стали в прокат без ограничений профиля. Полученные результаты позволили сделать вывод, что выплавленный по этой технологии металл подлежит обязательному вакуумированию, особенно в условиях повышенной влажности воздуха.

В целом, содержание водорода в металле опытных плавки стали Э76Ф после обработки вакуумом в течение 20 мин составило 1,24 ppm, а содержание водорода в металле опытных плавки стали НЭ76Ф после аналогичной обработки составляло 0,9 ppm.

Основные технико-экономические показатели опытных плавки и плавки сравнения стали Э76Ф приведены ниже:

Показатель	Значение показателя плавки		Отклонение
	опытной	сравнения	
Продолжительность плавки от выпуска до выпуска за вычетом простоев, мин . . . . .	58,4	65,9	-7,5
Продолжительность плавки «под током», мин . . . . .	41,6	46,8	-5,2
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т . . . . .	402	457	-55,0
Удельный расход коксовых отсевов, кг/т . . . . .	3,03	0	+3,03
Удельный расход силикомарганца, кг/т . . . . .	9,66	9,48	+0,18
Удельный расход ферросилиция ФС65, кг/т . . . . .	2,27	2,11	+0,16
Удельный расход пыли УСТК (для науглероживания на АКП), кг/т . . . . .	3,80	2,73	+1,07
Удельный расход электроэнергии на АКП, кВт·ч/т . . . . .	56,0	31,0	+25,0

Основные технико-экономические показатели опытных плавки и плавки сравнения (период 01.10.09 г. – 07.10.09 г.) стали НЭ76Ф приведены в таблице.

Технология позволила при выплавке стали Э76Ф уменьшить продолжительность плавки на 7,5 мин и удельный расход электроэнергии на 55 кВт·ч/т, при выплавке стали НЭ76Ф на 5,5 мин и 32 кВт·ч/т жидкой стали соответственно. При этом увеличился расход силикомарганца и ферросилиция, что обусловлено большей степенью окисленности металла перед выпуском из печи, повысился расход углеродсодержащих материалов (коксовых отсевов и пыли УСТК) для науглероживания металла.

Рельсовый прокат опытных плавки был подвергнут испытаниям в полном объеме в соответствии с ГОСТ Р 51685 – 2000. Химический состав опытного металла, загрязненность неметаллическими включениями и механические свойства рельсового проката после прокатки и термической обработки находятся на уровне показателей текущего производства и соответствуют требованиям нормативной документации. Содержание кислорода в металле опытных плавки ниже, чем на плавках текущего производства, и составляло в среднем 16,4 ppm (по базовой технологии 20 ppm). Результаты испытания на копровую прочность в состоянии после прокатки и термической обработки удовлетворительные, флокенов не выявлено.

При температуре +20 °С ударная вязкость рельсов категории Т1 из стали Э76Ф соответствовала показателю текущего производства и требованиям нормативной документации. Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии снижения окисленности полупродукта путем снижения массовой доли углерода на выпуске из ДСП на содержание кислорода в готовых рельсах и возможность снижения ограничения массовой доли углерода в металле перед выпуском из печи. Указанное обстоятельство имеет крайне важное значение, поскольку кислород, связанный в хрупкоразрушенные оксидные включения, представляет наибольшую опасность с точки зрения образования контактно-усталостных дефектов в процессе эксплуатации рельсов, и по рекомендациям ВНИИЖТ и ИМЕТ РАН им. Байкова его содержание не должно превышать 10 ppm.

Для установления влияния содержания кислорода на характер и количество неметаллических включений в рельсовой стали проведено металлографическое исследование стали рельсовых плавки с разным содержанием кислорода. Изменение длины строчки неметаллических включений в зависимости от содержания кислорода представлено на рис. 3.

При содержании кислорода в готовых рельсах менее 25 ppm встречаются в основном строчки хрупкоразрушенных алюминатов кальция ( $CaO \cdot Al_2O_3$ ) (рис. 4, а). Максимальная длина включений при таком содержа-

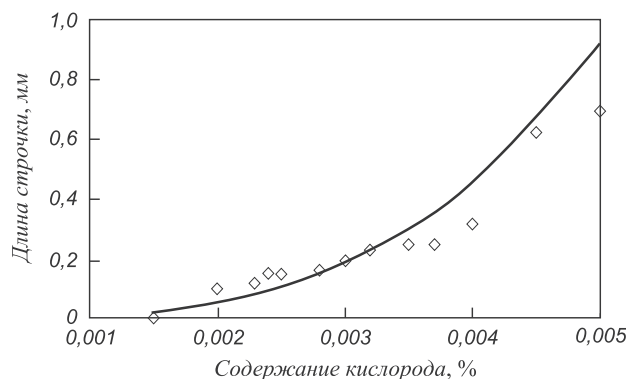


Рис. 3. Изменение длины строчки неметаллических включений от содержания кислорода

**Основные технико-экономические показатели опытных плавки и плавки сравнения  
(период 01.10.09 г. – 07.10.09 г.) стали НЭ76Ф**

Показатель	Значение показателя плавки				Отклонение	
	опытной		сравнения		ДСП-1	ДСП-2
	ДСП-1	ДСП-2	ДСП-1	ДСП-2		
Продолжительность плавки от выпуска до выпуска за вычетом простоев, мин	80,7	59,3	84,0	64,7	-3,3	-5,4
Продолжительность плавки «под током», мин	63,0	43,5	65,4	46,7	-2,4	-3,2
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	462	422	469	454	-7	-32
Удельный расход коксовых отсеков и пыли УСТК (для присадки во время выпуска из печи), кг/т	2,19		0		+2,19	
Удельный расход силикомарганца, кг/т	10,06		9,62		+0,44	
Удельный расход ферросилиция ФС65, кг/т	1,78		2,00		-0,22	
Удельный расход пыли УСТК (для науглероживания на АКП), кг/т	3,92		2,77		+1,15	
Удельный расход электроэнергии на АКП, кВт·ч/т	60,2		59,9		+0,3	

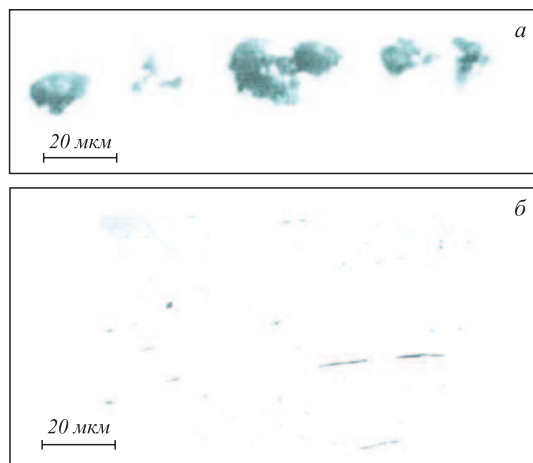


Рис. 4. Неметаллические включения в стали: алюминаты кальция (а) и силикаты (б)

нии кислорода не превышает 10 мкм. Уровень загрязненности стали алюминатами кальция оценивается в среднем не более 1 балла по шкале ГОСТ 1778 – 70. Несмотря на исключение из технологии раскисления материалов, содержащих алюминий, частицы оксида алюминия  $Al_2O_3$  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 ( $FeO \cdot SiO_2$ ). В составе силикатных включений встречаются алюминий и кальций. Силикатные включения наблюдаются на шлифах в виде тонких равномерно распределенных строчек темно-серого цвета длиной 0,12 – 0,30 мм. При более высоком (более 40 ppm) содержании кислорода неметаллические включения длиной 0,25 – 0,53 мм представлены в основном силика-

тами (рис. 4, б). Степень загрязненности стали этими 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, в связи с чем оксиды алюминия, заключенные в пластичную силикатную оболочку, являются, по-видимому, 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 (рис. 5, а), являются в основном частицами шлака и огнеупоров или шлакообразующей смеси, подаваемой в кристаллизатор.

В зависимости от состава многофазные шлаковые включения проявляют неодинаковую формируемость

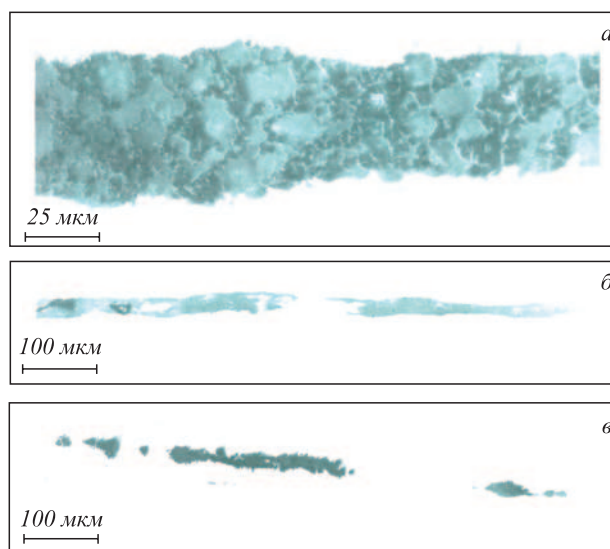


Рис. 5. Неметаллические (а), силикатные (б) и хрупкоразрушенные оксидные (в) включения экзогенного характера

при прокатке. Одни включения, в состав которых входят оксиды марганца, кремния, алюминия, кальция, серы, пластически деформируются при прокатке, образуя грубые строчки с острыми или расщепленными концами (рис. 5, б). Включения, состоящие из оксидов кальция, кремния, марганца, алюминия, титана, магния, калия, серы, не деформируются и образуют волнистую строчку (рис. 5, в). Исследования показали, что достижение цели снижения содержания кислорода в стали приводит к заметному уменьшению количества деформируемых силикатных включений и возрастанию доли хрупкоразрушенных сложных оксидов. Опыт полигонных испытаний опытных партий на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ показал, что эксплуатационная стойкость рельсов партии К 23, отличающихся повышенным содержанием силикатов, оказалась выше по сравнению с рельсами партий Т17-22 из вакуумированной стали, отличающейся существенно меньшим количеством силикатов и большим количеством алюминатов кальция [2].

Представленные результаты однозначно свидетельствуют о том, что эксплуатационная стойкость рельсов не определяется только содержанием кислорода в стали, а предопределена типом неметаллических включений. Для обеспечения наиболее высоких служебных свойств рельсов, безусловно, предпочтительна минимальная загрязненность неметаллическими включениями, однако все более отчетливой и очевидной становится проблема обеспечения определенного вида и состава неметаллических включений при снижении содержания общего кислорода в стали.

Исследования образцов по содержанию неметаллических включений выявили существенную зависимость длины строчек неметаллических включений от массовой доли кислорода в стали. Снижение содержания кислорода в рельсовой стали до 10 – 15 ppm обеспечивает уменьшение длины строчек включений с 0,8 мм до их полной минимизации [2].

Разрабатываемый в настоящее время новый проект ГОСТ Р 51685 – 2000 предусматривает ужесточение требований и норм по уровню содержания кислорода с 35 до 20 ppm. В этой связи дальнейшая оптимизация и отработка технологии производства рельсовой стали предусматривает получение стали с более низкими уровнями содержания кислорода и неметаллических включений по сравнению с достигнутыми. Указанные показатели обеспечиваются при выплавке рельсовой стали с содержанием углерода в полупродукте перед выпуском из печи в интервале 0,10 – 0,30 % и обязательной присадкой в ковш в начале выпуска металла из ДСП просушенной коксовой мелочи (влажностью до 2 %) в количестве 600 – 900 кг/плавку [3].

Основные технологические показатели (в числителе средние, в знаменателе минимальные и максимальные значения) опытных плавов и плавов сравнения приведены ниже:

Показатель	Значение показателя плавки	
	опытной	сравнения
Массовая доля углерода в металле перед выпуском, % . . . . .	0,23 0,13 – 0,28	0,45 0,42 – 0,49
Масса присаженного силико-марганца, кг/плавку . . . . .	774,0 765 – 791	794,5 772 – 832
Масса присаженной коксовой мелочи, кг/плавку . . . . .	750 600 – 900	290 240 – 340
Массовая доля углерода в первой ковшевой пробе, % . . . . .	0,53 0,42 – 0,68	0,52 0,43 – 0,60
Усвоение углерода из кокса на выпуске, % . . . . .	65,2 50,3 – 82,7	78,0 69,3 – 87,2
Температура выпуска металла из ДСП, °С . . . . .	1680 1651 – 1705	1654 1637 – 1665

Технико-экономические показатели опытных плавов [4] (числитель) и плавов сравнения (знаменатель) представлены ниже:

Показатель	Значение показателя
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·ч/т жидкой стали . . . . .	432/433
Удельный расход твердого чугуна, кг/т жидкой стали . . . . .	350/348
Удельный расход кислорода, м³/т жидкой стали . . . . .	40,32/33,51
Известь, кг/т жидкой стали . . . . .	51,04/49,17

Основные технико-экономические показатели (расход электроэнергии и длительность плавки) при использовании опытной технологии улучшаются. Показатели качества отвечают требованиям ГОСТ Р 51685 – 2000, а также требованиям Регламента внесения изменений в технологический процесс производства рельсовой продукции. Загрязненность неметаллическими включениями ниже, а механические свойства рельсового проката (как в состоянии прокатки, так и после проведения термической обработки) выше соответствующих показателей текущего производства. Содержание кислорода составило в среднем 15,6 ppm, что отвечает требованиям для рельсового металла высшей категории качества (категории «В»). Таким образом, показана принципиальная возможность снижения нижней границы содержания углерода в металле перед выпуском для рельсовой стали Э76Ф, подвергаемой вакуумной дегазации, до уровня не менее 0,10 %.

**Выводы.** Разработана технология производства вакуумированной рельсовой стали с выпуском металла из печи с пониженным (не менее 0,10 %) содержанием углерода и присадкой на выпуске в ковш углеродсодержащего материала. Эта технология обеспечивает низ-

кий уровень содержания кислорода и отсутствие флокенов в готовых рельсах, снижает уровень загрязненности стали по строчкам хрупкоразрушенных оксидов и обеспечивает требуемый уровень ударной вязкости.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Железнодорожные рельсы из электростали / Н.А. Козырев, В.В. Павлов, Л.А. Годик, В.П. Дементьев. – Новокузнецк: Изд-во НПК, 2006. – 388 с.

2. Годик Л.А., Козырев Н.А., Корнева Л.В. // Сталь. 2009. № 3. С. 29, 30.
3. Юрьев А.Б., Годик Л.А., Козырев Н.А. и др. // Сталь. 2009. № 2. С. 30, 31.
4. Пат. 2415180 РФ. Способ производства рельсовой стали / И.В. Александров, Н.А. Козырев, Е.П. Кузнецов и др. Заявл. 25.11.2009; опубл. 27.03.2011.

© 2012 г. *Н.А. Козырев, Е.В. Протопопов, Р.С. Айзатулов, Д.В. Бойков*  
Поступила 7 октября 2011 г.

УДК 669.1.536.24.001.1:621.791.793

*И.А. Павлюченков, С.А. Усенко*

Днепродзержинский государственный технический университет

### О РЕШЕНИИ СОПРЯЖЕННОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ДЛЯ СЛИТКА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ

Развитие современного промышленного производства (особенно таких отраслей, как энергетическое машиностроение, электроника, черная металлургия) сопровождается постоянным повышением требований к применяемым в них деталям машин и агрегатов. Это влечет за собой необходимость использования слитков из сложнолегированных сталей и сплавов (в том числе и композитов), а также слитков больших геометрических размеров.

Среди металлургических процессов, которые обеспечивают получение качественного слитка, много лет достойное место занимают электрошлаковые технологии (электрошлаковая сварка и наплавка, переплав и литье, рафинирование металлов и т.д.) [1]. Электрошлаковые технологии в классическом варианте, как правило, основаны на переплаве расходного электрода и характеризуются некоторыми общими чертами, а именно, жесткой связью между температурными параметрами электрошлакового процесса и его производительностью, центральным подводом тепла к заготовке, периферийным (боковым) теплоотводом от нее. Однако эти особенности электрошлаковых технологий в некоторой степени ограничивают возможности выполнения предъявляемых требований.

На современном этапе развития электрошлаковых технологий нашел применение новый способ получения высококачественных слитков (разработан в институте электросварки им. Е.О. Патона), основанный на совместном применении токоподводящего секционного кристаллизатора и жидкого металла. Такая технология, используемая ЗАО «Новоукраинский машиностроительный завод», позволяет разделить процессы плавления и затвердевания металла [2].

Достаточно подробно теоретически изучены в отдельности электрические, тепловые и гидродинамиче-

ские процессы, происходящие в шлаковой и металлической ваннах при электрошлаковом переплаве [3, 4]. Но эти процессы неразрывно связаны друг с другом, и поэтому возникает задача комплексного их рассмотрения.

Целью настоящей работы является создание математической модели для решения сопряженной термогидродинамической задачи с учетом наличия внутренних источников тепла в шлаковой ванне и распределения температуры в охлаждающем потоке воды.

Особенностями процесса получения крупного слитка методом электрошлаковой наплавки жидким металлом в токоподводящем секционном кристаллизаторе являются использование секционного кристаллизатора (секции разделены по высоте между собой, каждая выполняет свою функцию), применение слитка (металлической вставки), который наплавляется в ходе процесса, в качестве макроохлаждильника.

Процесс затвердевания металла (наплавляемого слоя) происходит в интервале температур ликвидуса  $t_L$  и солидуса  $t_S$  (переход из жидкого в твердое состояние с образованием двухфазной зоны).

Расчет ведется с момента заполнения полости кристаллизатора жидким металлом под слоем шлаковой ванны. Принимается, что жидкий металл подается в одном месте, мгновенно и равномерно распределяется по всей верхней поверхности кристаллизатора. Металлическая вставка имеет гладкую поверхность без дефектов. В процессе формирования слитка проходит ряд стадий, отличающихся теплофизическими и физико-химическими условиями. Задача является осесимметричной, поэтому в качестве расчетной области (рис. 1) выбрана половина поперечного сечения цилиндрического слитка.