

Бизюков Павел Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ,  
ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ОКИСЛЕННОСТЬ  
МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА,  
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА  
КОРДОВОЙ СТАЛИ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных  
и редких металлов

автореферат диссертации на соискание степени  
кандидата технических наук

Москва, 2007

Диссертационная работа выполнена на кафедре металлургии стали и ферросплавов Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Казаков С. В.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Серов Г. В.

кандидат технических наук Клачков А. А.

Ведущее предприятие:

ОАО «Нижнесергинский метизно-металлургический завод»,  
(г. Ревда, Свердловская обл.)

Защита состоится 24 мая 2007 г. на заседании диссертационного совета Д 212.132.02 при Московском государственном институте стали и сплавов (технологическом университете) по адресу: 119049, г. Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, д. 6, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного института стали и сплавов.

Автореферат разослан 23 апреля 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
профессор

Семин А. Е.

# Общая характеристика работы

## Актуальность работы

Определяющей тенденцией развития черной металлургии является все более полное удовлетворение запросов потребителей в условиях постоянного снижения качества сырья и ужесточения требований к защите окружающей среды. Повышение качества кордового металла способствует уменьшению веса кордовой пряди за счет повышения прочностных свойств металла, то есть, в конечном счете, ведет к уменьшению веса шин и повышению их долговечности, что снижает вес автомобиля и, как следствие, расход топлива.

В связи с тем, что наиболее существенным фактором, определяющим механические свойства кордовой нити, главное — ее разрывность, являются неметаллические включения, существующие технологии производства кордового металла жестко ориентированы на применение весьма чистой, то есть весьма дорогой металлошхты и на использование дорогостоящих комплексов внепечной обработки металла. Это ведет к резкому повышению расходов по переделу и снижает конкурентоспособность производителя. Решение задачи повышения качества кордового металла при одновременном снижении расходов по переделу может быть достигнуто на основании подхода, предполагающего наряду с интенсификацией процесса управление содержанием кислорода в стали на всех этапах технологического процесса, начиная с момента выплавки, вплоть до получения готовой жидкой заготовки.

## Научная новизна

Основными научными результатами следует считать:

- 1) Показано, что растворение кислорода в металле во время продувки плавки в ДСП газообразным кислородом происходит по двухступенчатой схеме, предполагающей образование на первом этапе оксидов ( $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ) с последующим растворением кислорода в металлическом расплаве из оксидной фазы;
- 2) Выявлены значимые факторы, определяющие содержание кислорода в расплаве (состав металла, шлака, температура) и предложена модель, адекватно описывающая содержание кислорода в металле в конце перед выпуском плавки из печи, что позволяет оптимизировать процесс выплавки по содержанию кислорода в металле;

- 3) Экспериментально показана возможность регулирования скорости кислородного рафинирования расплава в печи с помощью донного перемешивания — скорость окисления углерода на плавках с продувкой составила 0,0057 %/мин против 0,0021 %/мин на плавках без продувки;
- 4) Предложен и обоснован механизм вторичного окисления стали во время выпуска, предполагающий насыщение расплава кислородом атмосферы за счет работы струи во время выпуска в качестве «насоса»;
- 5) Выявлены значимые факторы, определяющие поведение кислорода в расплаве на стадии внепечной обработки (окисленность печного шлака, присадки раскислителей) и разработана модель, адекватно описывающая его поведение на всех стадиях внепечной обработки.

### **Практическая значимость**

- 1) Предложена концепция получения качественного кордового металла, предполагающая смещение технологической нагрузки со стадии внепечной обработки на этапы выплавки и выпуска, предполагающая снижение содержания кислорода в металле перед окончательным раскислением и регулирование состава покровного шлака на стадии внепечной обработки;
- 2) Разработаны модели, адекватно описывающие поведение кислорода в стали на различных этапах производства — от выплавки до внепечной обработки, которые могут быть использованы для оптимизации процесса и управления плавкой, в том числе могут быть использованы при построении АСУ ТП;
- 3) Разработана и опробована методика углеродного раскисления металла и шлака в ДСП путем инъекции углеродсодержащих материалов, а также предложена технология комплексного раскисления (карбидом кремния) на выпуске металла из печи. Установлено положительное влияние данных мероприятий на снижение окисленности металла даже при небольших расходах материалов;
- 4) На основании результатов промышленных испытаний в условиях ЭСПЦ-1, 2 РУП «Белорусский металлургический завод» предложенных мероприятий, внесены изменения в действующую технологическую инструкцию. Результаты контроля у конечного потре-

бителя показали положительное влияние предложенной технологии на его качество.

## **Апробация работы**

Материалы диссертации доложены и обсуждены на конгрессах, симпозиумах и семинарах: Symposium of Croatian Metallurgical Society «Materials and Metallurgy», Croatia, Zagreb, 2000 г.; «Современные проблемы металлургического производства», Волгоград, 2002 г.; «Металлургия XXI века». Международная научно-техническая конференция, посвященная 20-летию Белорусского металлургического завода, 2004 г., г. Жлобин; VIII конгресс сталеплавильщиков, Нижний Тагил, 2005 г.

## **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ в центральных научных журналах и сборниках.

## **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения, изложена на 168 стр. машинописного текста, содержит 96 рисунков и 42 таблицы. Библиографический список содержит 129 наименований.

## **Содержание работы**

### **Цель работы и выбор подхода к решению поставленной задачи**

Повышение качества металла ответственного назначения, тем более, напрямую связанного с безопасностью жизнедеятельности человека, приобретает в последнее время особое значение. Это ведет к постоянному повышению требований как к готовому изделию — кордовая проволока, бортовая проволока, так и последовательно к качеству литой заготовки. На практике установлено и закреплено в ГОСТах и ТУ (ТУ 14-1-1881-76, ТУ 14-1-4752-89, ТУ 14-1-4101-89, ГОСТ 4543-71, ГОСТ 10702-78, ГОСТ 1050-88), что кордовая сталь должна быть не только чиста по содержанию вредных примесей (сера, фосфор),

иметь пониженное содержание цветных металлов и газов, но и отвечать повышенным требованиям по количеству, морфологии и размеру неметаллических включений (НВ). При диаметре проволоки для корда 0,15... 0,35 мкм даже незначимые в других условиях НВ могут привести к ее разрушению в процессе изготовления или свивки, когда металл испытывает знакопеременные нагрузки большой величины. Анализ качества кордового металла показал, что наиболее вредное влияние на его качество оказывают недеформируемые включения на основе  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$ . Особенно остро стоит проблема включений корунда в связи с широко распространенной практикой использования алюминия для глубокого раскисления стали. Металлографические исследования показали, что в процессе деформации дислокации, заканчивающиеся на включении, постепенно объединяются и превращаются в полости, которые могут привести к разрушению проволоки. Деформируемые включения оказывают существенно меньшее негативное воздействие, однако также увеличивают разрывность корда. С учетом того, что основными включениями в кордовой стали являются оксиды, особую актуальность приобретает процесс снижения их количества в стали, изменения их морфологии и уменьшения их размера, что невозможно решить не управляя их основным ингредиентом — кислородом.

В настоящее время преобладающей является концепция, предполагающая максимальную интенсификацию сталеплавильных процессов. Такой подход неизбежно сопровождается повышением, во-первых, расхода кислорода, как основного интенсификатора плавки, а во-вторых, раскислителей, с помощью которых впоследствии снимается избыточная окисленность металла. При такой схеме производства образуется повышенное количество продуктов раскисления — НВ, которые затем удаляют из расплава методами внепечной металлургии. Это означает значительный перекоп в технологии с переносом тяжести решения проблемы получения качественного металла на стадию внепечной обработки стали. Как следствие, внепечная обработка становится излишне усложнена, энерго- и материалоемка, что ведет к повышению расходов по переделу. И хотя именно с помощью такой технологии в настоящее время производят качественный кордовый металл, необходимость снижать расходы по переделу диктует необходимость ее совершенствования.

Все более актуальной становится разработка технологии, обеспечивающей высокое качество металла за счет, прежде всего, точного регулирования состава металла, в том числе и по содержанию кислорода.

В условиях современного производства, без снижения производительности, этого можно достичь только за счет управления процессом на основе применения физически обоснованных моделей, позволяющих прогнозировать поведение кислорода, начиная с момента выплавки стали в ДСП, вплоть до получения готового металла.

Решение поставленной задачи представляет собой нетривиальную проблему в связи с высокой реакционной способностью кислорода и исключительной сложностью процессов, протекающих на всех стадиях металлургического производства. Например, в условиях РУП «БМЗ», выплавка стали ведется в сверхмощных дуговых печах, оснащенных средствами интенсификации, такими как горелки, манипуляторы, фурмы, через которые в процессе плавки в печь вдувают газообразный кислород. По ходу процесса в печь также вводят углеродсодержащие материалы как для вспенивания шлака, так и для раскисления. В шихтовку для получения низкого содержания цветных металлов вводится значительное количество первородного сырья (металлизированных окатышей).

Как правило, при моделировании процессов плавки стремятся спрогнозировать поведение углерода и температуры, предполагая, что между концентрациями кислорода и углерода существует жесткая связь. Однако, известно, что сразу после продувки газообразным кислородом расплав очень далек от равновесия, что делает такую оценку недостоверной.

В связи со сложностью изучаемого объекта (ДСП) и при наличии средств экспрессного определения содержания кислорода в стали, моделирование поведения кислорода по ходу процесса смещается из фокуса внимания металлургов. Однако, надежно управлять процессом без использования физически обоснованных моделей, адекватно описывающих его поведение, полагаясь только на результаты измерений, невозможно.

Содержание кислорода в готовой стали формируется на протяжении всего технологического цикла, а не только в печи. Особую актуальность в связи с этим приобретают процессы вторичного окисления во время выпуска и разлива. Однако, в связи с их сложностью при построении технологии либо опираются на опытные данные, либо пренебрегают ими, предполагая, что окисленный расплав не будет значительно поглощать кислород из атмосферы. Однако термодинамический анализ показывает, что система металл-атмосфера далека от равновесия, то есть игнорировать эту стадию технологического

процесса нельзя.

Несмотря на глубокую изученность и понимание процессов, протекающих при внепечной обработке, основное внимание концентрируется на собственно проведении процесса раскисления, тогда как процессы вторичного окисления за счет контактирующих фаз, как правило, не становятся предметом тщательного исследования. Обеспечение высокого качества, тем не менее, предполагает, не только максимальное снижение содержания первичного кислорода и удаление неметаллических включений, но и предотвращение развития процессов вторичного окисления.

В связи с изложенным, перед работой была поставлена задача — исследовать поведение кислорода на всех стадиях металлургического передела от выплавки до внепечной обработки, выявить факторы, оказывающие значимое влияние на содержание кислорода, описать поведение кислорода в зависимости от этих факторов и разработать мероприятия, позволяющие снизить содержание активного кислорода в расплаве перед окончательным осаждающим раскислением.

## **Технология производства кордовой стали**

Работу проводили в условиях РУП «БМЗ», сталеплавильное производство (рис. 1) которого состоит из трех 100-тонных дуговых печей и трех МНЛЗ.

Дуговая сталеплавильная печь № 1 оснащена сифонным, а ДСП №№ 2 и 3 эркерным выпуском металла, все три печи оборудованы трансформаторами мощностью по 75 МВА и 3-мя для каждой печи стенowymi газокислородными горелками мощностью 3 МВт каждая. ДСП № 3 дополнительно оборудована дверной газокислородной горелкой мощностью 5 МВт, двумя манипуляторами для вдувания кислорода и углеродосодержащих материалов и установкой для вдувания в печь доломитовой муки.

Основная технология выплавки — одношлаковый процесс с «жидким» стартом с использованием в шихте углеродистого металлолома, передельного чушкового чугуна и металлизированных окатышей.

Принятая технология производства кордовой стали предусматривает шихтовку плавки двумя частями - загрузка металлолома и чугуна корзиной в печь и непрерывная подача металлизированных окатышей в печь после расплавления лома и чугуна.

Плавка ведется по одношлаковому окислительному процессу с оставлением части металла (5...7 т) в печи для интенсификации



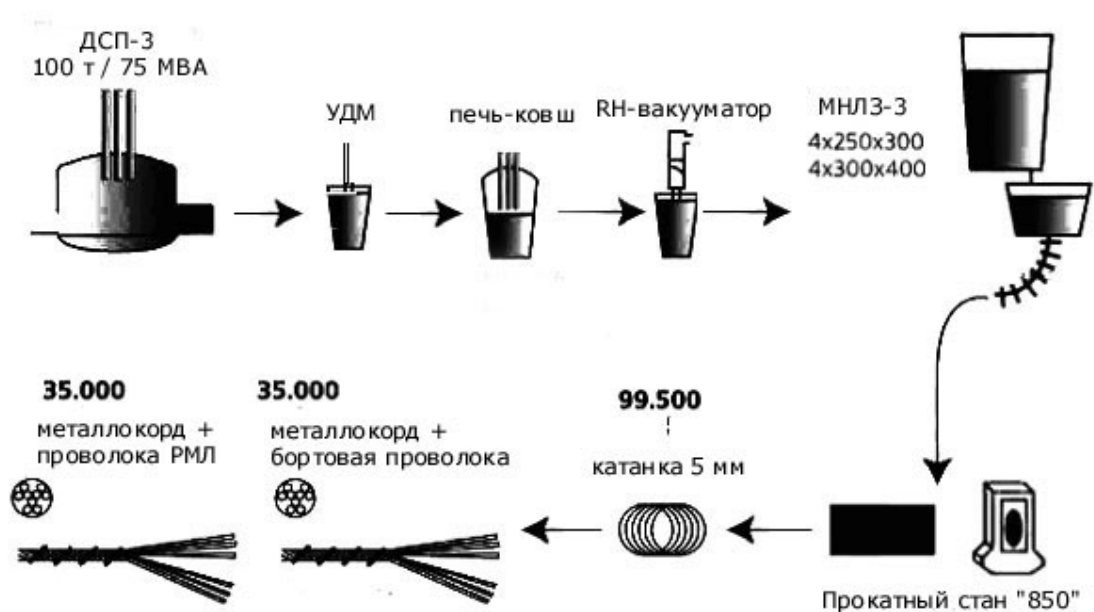


Рис. 1. Проектная схема производства кордовой стали на РУП «БМЗ».

плавления шихты следующей плавки. В течение всей плавки металл перемешивается аргоном через донные фурмы с различной интенсивностью, в зависимости от периода плавки: минимальная интенсивность в начале плавки при наличии твердой шихты, максимальная - после полного расплавления лома и чугуна. Интенсивность продувки привязана к электрическому режиму плавки.

Металл выпускают в ковш, предварительно присадив на дно известь (180...200 кг) и плакировый шпат (70...100 кг). По мере наполнения ковша под струю металла отдают ферромарганец (400...600 кг) и ферросилиций (200...300 кг).

После выпуска металл подвергают усреднительному перемешиванию аргоном на установке доводки металла (УДМ) в течение 15...20 мин. после чего передают на установку печь-ковш (ПК). Обработка металла на ПК проводится в два этапа. 1-ый этап заключается в рафинировании металла от серы, для чего в ковше наводят основной шлак ( $B = 1,5...2$ ) присадками извести. Нагрев металла ведут при одновременном перемешивании аргоном через пористую пробку в днище ковша с интенсивностью (250...300 л/мин или 15...18 м<sup>3</sup>/час) и производят присадку кварцевого песка массой 150...200 кг.

Обработка на циркуляционном вакууматоре проводится при остаточном давлении в вакуум-камере 5 мбар (500 Па). На первом эта-

пе вакуумной обработки вакуумное раскисление металла, на втором — легирование металла пироуглеродом (100...200 кг), ферромарганцем (600...800 кг) и ферросилицием (200...300 кг). Общая продолжительность обработки составляет около 20 мин.

При необходимости химический состав металла корректируют (в основном, по углероду или сере) — присадками порошковой проволоки.

После окончания внепечной обработки металл разливают на МНЛЗ-3 в блюмы сечением 300 × 400 мм со скоростью до 0,6 м/мин. Струя металла на участке «стальковш-промковш» защищают огнеупорной трубой, а на участке «промковш- кристаллизатор» — погружным стаканом.

## Характеристика первичных данных, способ контроля процесса

При решении поставленной задачи был сформирован массив опытных плавов (950 плавов) содержащий максимум информации для каждой плавки (схема сбора информации по плавке представлена на рис. 2).

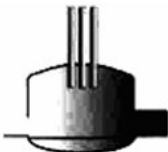




Место отбора пробы или замера					
металл	● ●	●	● ●	●	●
шлак	●		● ●		
активность кислорода		●	●	●	
температура	● ●	● ●	● ●	●	●

Рис. 2. Схема сбора информации по опытным плавкам

Оценку качества кордового металла производили по результатам электронно-зондового микроанализа образцов катанки по методике фирмы «Пирелли», в соответствии с которой неметаллические включения классифицируются по химическому составу, размеру, а также по количеству включений на единицу поверхности (плотность неметаллических включений, см<sup>-2</sup>). Результаты анализа всех образцов с одной

плавки наносятся на тройную диаграмму, пример которой приведен на рис. 3.

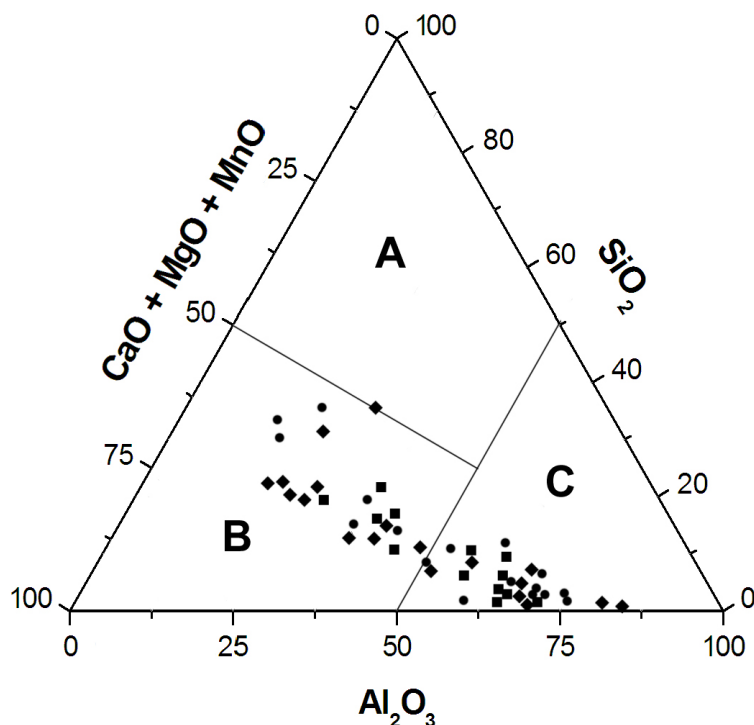


Рис. 3. Стандартная схема оценки загрязненности стали НВ по методике фирмы «Пирелли».

Отдельные области диаграммы (А, В и С) соответствуют химическим композициям, в которых преобладает определенный оксид. Наиболее неблагоприятным является присутствие в катанке включений имеющих состав, соответствующий зоне С, где преобладающим является  $Al_2O_3$ .

Величина плотности неметаллических включений в катанке для производства автомобильного металлокорда не должна превышать  $1000 \text{ см}^{-2}$ .

### Анализ технологии производства кордовой стали

Предположение о том, что активность кислорода в металле перед раскислением будет оказывать влияние на уровень загрязненности металла неметаллическими включениями нашло свое подтверждение при анализе промышленных данных (рис. 4). Этот факт, демонстрирующий связь между начальной и конечной стадиями всего технологического процесса, свидетельствует о том, что борьба со свободным

кислородом в металле должна начинаться еще на стадии выплавки металла.

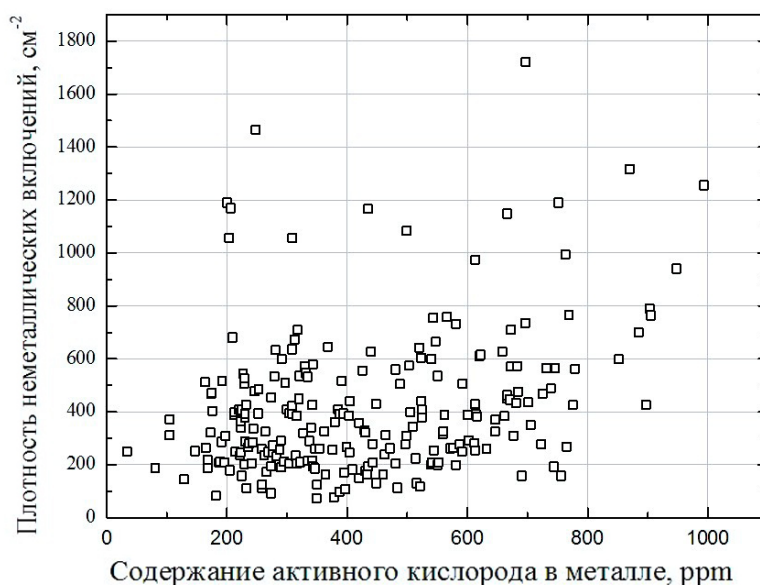


Рис. 4. Связь между окисленностью металла в печи и плотностью неметаллических включений в катанке.

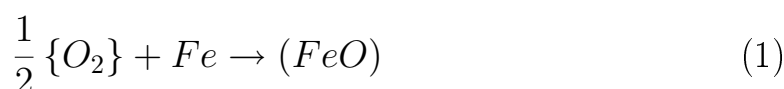
Тем более, что основное изменение концентрации кислорода в металле, а, следовательно, образование неметаллических включений, происходит именно в период плавки и раскисления во время выпуска металла из печи (рис. 5).

## Выплавка стали в ДСП

Статистический анализ первичной технологической информации показал, что значимые связи между вдуваемым объемом кислорода и активным кислородом, растворенным в металле отсутствуют (рис. 6), что свидетельствует о многофакторности и нелинейности процесса его взаимодействия с расплавом. С помощью пошагового и весового регрессионного анализа (табл. 1) установили, что наиболее значимые связи существуют между растворенным кислородом и содержанием компонентов в шлаке.

На этом основании предположили, что растворение кислорода в расплаве происходит в 2 стадии:

1. Окисление железа и примесей на поверхности металла в месте контакта струи газа с ванной, например:



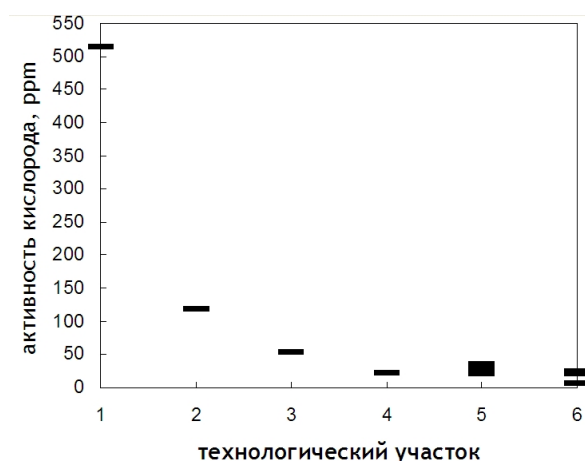


Рис. 5. Динамика изменения окисленности на различных технологических участках.

1 — печь (после отключения печи, за 1-2 мин. до выпуска); 2 — УДМ (через 1-2 мин. после окончания выпуска, до отдачи АКС); 3 — УДМ (после отдачи АКС и 15 мин. продувки аргоном); 4 — УДМ (перед отдачей на печь-ковш, через 40 мин после выпуска); 5 — ПК (через 5-10 мин. после начала обработки, после отдачи извести); 6 — ПК (после 40-50 мин. после начала обработки);

**Примечание:** замеры в печи представлены усредненным значением  $a_O$ .

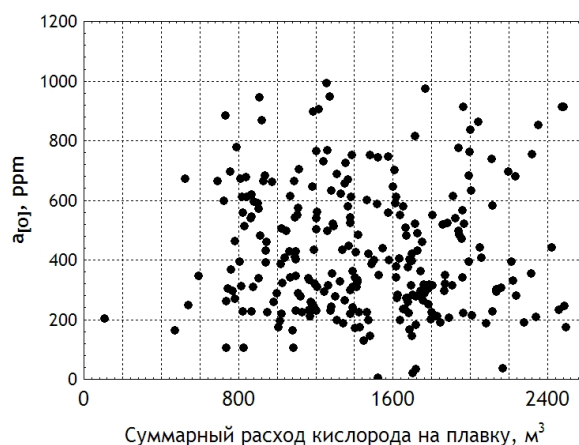


Рис. 6. Связь между суммарным расходом кислорода на плавку и содержанием кислорода в металле перед выпуском.

Таблица 1. Определение значимых факторов с помощью пошагового и весового регрессионного анализа.

факторы	Весовой метод		Пошаговый метод	
	порядок исключения факторов	$r_1$	$k_i$	$r_2$
SiO <sub>2</sub>	1	0,7856747	-0,004949	0,896046
Чугун	2	0,7856714	0,003477	0,762731
Работа под током	3	0,7856584	0,005290	0,597143
O <sub>2</sub> горелок	4	0,7856414	-0,020573	0,933074
Электроэнергия	5	0,7856216	-0,016650	0,812625
Известь	6	0,7855977	0,008326	0,333859
Si	7	0,7855693	0,009103	0,552022
C	8	0,7854564	-0,016601	0,666445
Mn	9	0,7854175	0,023974	0,860257
CH <sub>4</sub>	10	0,7853391	0,031089	0,917367
P	11	0,7852599	-0,020346	0,793460
Лом	12	0,7851600	0,018797	0,911334
Окатыши	13	0,7850607	0,035960	0,873374
(S)	14	0,7849781	0,042017	0,856715
Ar	15	0,7848709	0,011796	0,198178
[S]	16	0,7846988	0,016396	0,568701
Cr	17	0,7844884	-0,049177	0,861325
Ж/р окатыши	18	0,7843160	-0,013521	0,252872
O <sub>2</sub> дутья	19	0,7838706	-0,021878	0,561128
MgO	20	0,7840826	0,034840	0,693171
Сталь	21	0,7836517	-0,013227	0,146039
Вес жидкого металла	21	0,7833236	0,018191	0,444975
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	22	0,7829648	-0,052841	0,864044
Продолжительность плавки	23	0,7823134	-0,023678	0,157466
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>			<b>0,117497</b>	<b>0,910592</b>
<b>CaO</b>			<b>-0,263147</b>	<b>0,959674</b>
<b>FeO</b>			<b>0,209577</b>	<b>0,929237</b>
<b>MnO</b>			<b>-0,070541</b>	<b>0,813180</b>
<b>Присадка руды</b>			<b>0,057238</b>	<b>0,118837</b>
<b>Температура</b>			<b>1,190819</b>	<b>0,738200</b>

2. Переход кислорода в раствор из оксидов, образовавшихся на первом этапе:



Первая стадия - процесс образование оксидов, описали следующим выражением:

$$(FeO) = -k_1 \cdot Q_{O_2} \quad (3)$$

где  $k_1$  - коэффициент, определяющий долю кислорода дутья, пошедшего на окисление компонентов расплава, в данном случае железа.

В табл. 2 приведены коэффициенты регрессионных уравнений, описывающих связь между содержанием  $(FeO)$  и  $(MnO)$  в шлаке, как оксидов определяющих окисленность шлака, перед выпуском и

суммарным расходом кислорода на плавку.

Таблица 2. Коэффициенты уравнения для расчета содержания оксидов в печном шлаке

Оксид	$k_i$	$r$
FeO	-0,00008	0,71
MnO	-0,0001	0,65

Однако конечный состав шлаковой фазы в печи формируется не только вследствие протекания процессов окисления, но и как результат непосредственного перехода оксидов в шлак из присаживаемых материалов, в частности из окатышей. Массу оксидов поступивших из окатышей оценивали, по массе шлака, которую рассчитали по содержанию ( $CaO$ ).

$$m_{\text{шлака}} = m_{\text{извести}} \frac{100\%}{(\%CaO)_{\text{шлака}}} \quad (4)$$

Полученные зависимости адекватно описывают содержание основных компонентов шлака (рис. 7)

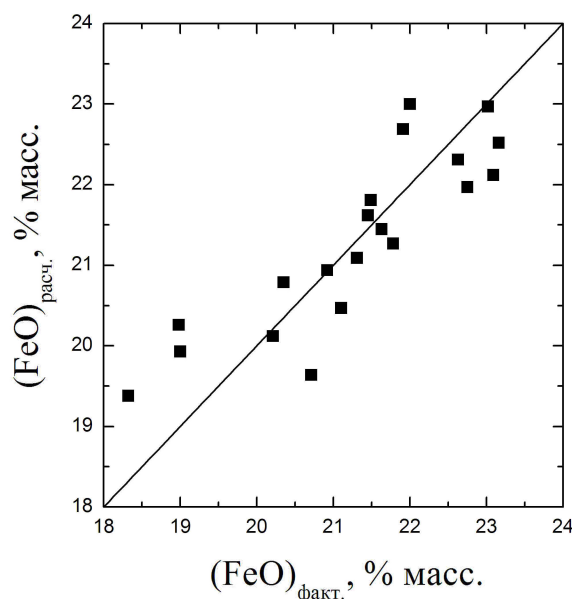


Рис. 7. Сравнение фактических и расчетных содержаний (FeO) в шлаке перед выпуском.

На втором этапе (переход кислорода из шлака в расплав) использовали зависимость:

$$\ln[O]_{\tau} = \ln[O]_0 + k_1 \cdot \tau + k_2 \cdot \tau \cdot \ln(FeO)' + k_3 \cdot \tau \cdot \ln(MnO)' + k_4 \cdot \ln[C] \quad (5)$$

где  $(FeO)'$ ,  $(MnO)'$  — расчетное значение содержания оксида в шлаке.

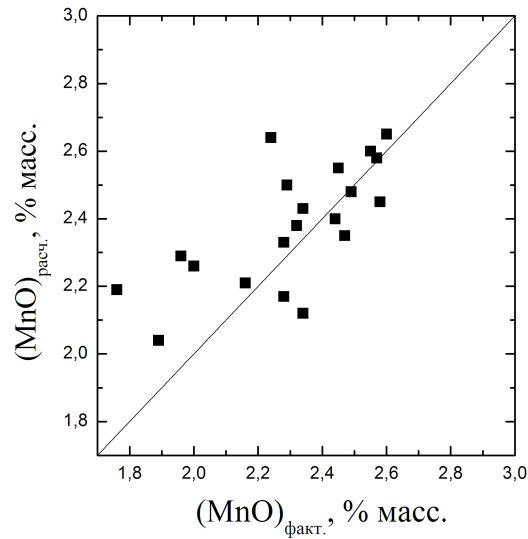


Рис. 8. Сравнение фактических и расчетных содержаний (MnO) в шлаке перед выпуском.

Таблица 3. Коэффициенты уравнения для прогноза содержания кислорода в конце плавки в ДСП

$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$r$
-0,35	0,322	0,036	-0,42	0,47

На рис. 9 приведено сравнение фактических и расчетных значений концентрации кислорода в металле перед выпуском плавки из печи.

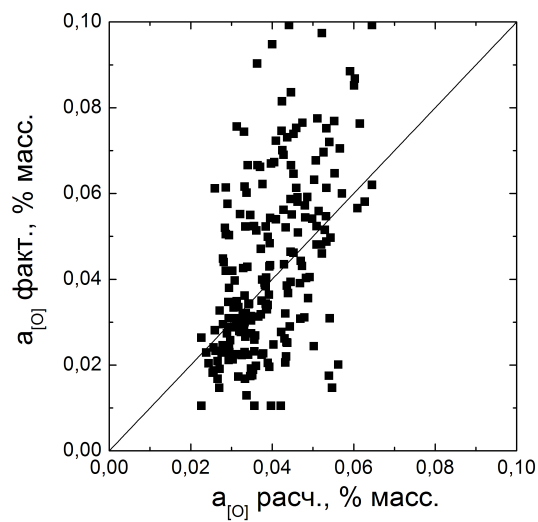


Рис. 9. Сравнение фактических и расчетных содержаний активного кислорода в металле перед выпуском из печи.



При этом результаты термодинамических расчетов окисленности металла под шлаком конца выплавки по ТРИР (теория Кожеурова) показали, что фактические содержания кислорода в металле намного ниже равновесных (рис. 10), что свидетельствует об отклонении системы от равновесия и о необходимости повышать интенсивность донного перемешивания.

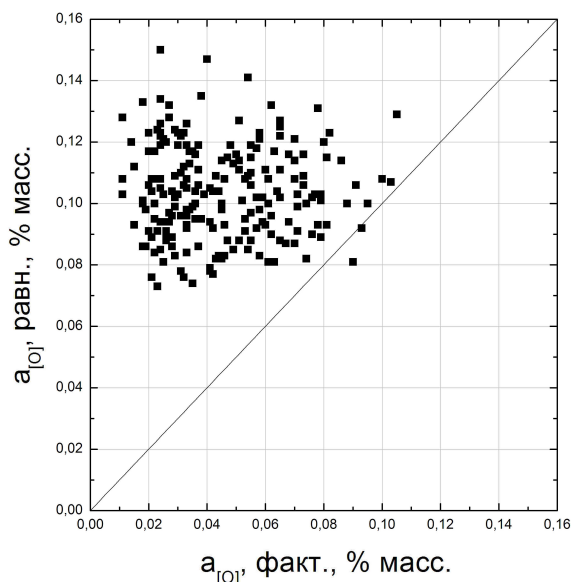


Рис. 10. Сравнение фактических и равновесных содержаний кислорода в металле под шлаком конца периода выплавки в ДСП.

Эти предположения нашли подтверждение при исследовании влияния донного перемешивания на скорость окисления углерода: на плавках с продувкой скорость окисления оказалась почти в 2 раза выше, что позволило значительно сократить продолжительность плавки (рис. 11).

Управлять окисленностью металла можно, либо регулируя окисленность шлака, либо непосредственно понижая окисленность расплава перед выпуском металла из печи. Провели эксперименты по раскислению металла перед выпуском путем вдувания в расплав углеродсодержащих материалов. Науглероживание осуществлялось путем вдувания в течение 25 с в расплав углеродсодержащих материалов в количестве 50 и 75 кг. В качестве несущего газа использовали как воздух, так и азот. Контроль окисленности металла проводили до и после вдувания науглероживателя при помощи кислородного зонда.

Данные измерений показывают, что изменения окисленности стали колеблются в пределах 1,1...29,5 % отн. При этом наибольшее

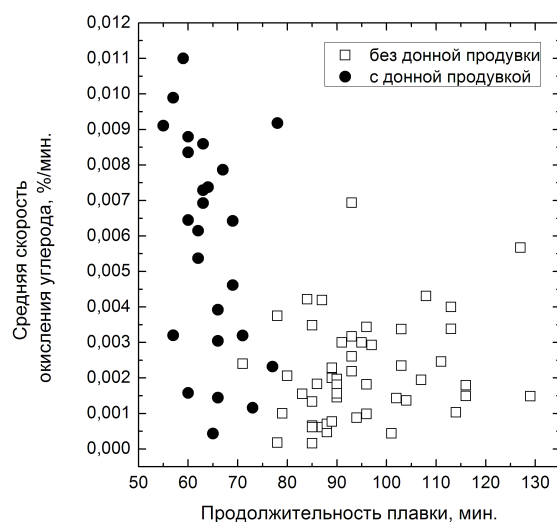


Рис. 11. Влияние донной продувки на скорость окисления углерода в ДСП.

снижение активности кислорода наблюдали для плавов с большими начальными значениями окисленности (рис. 12).

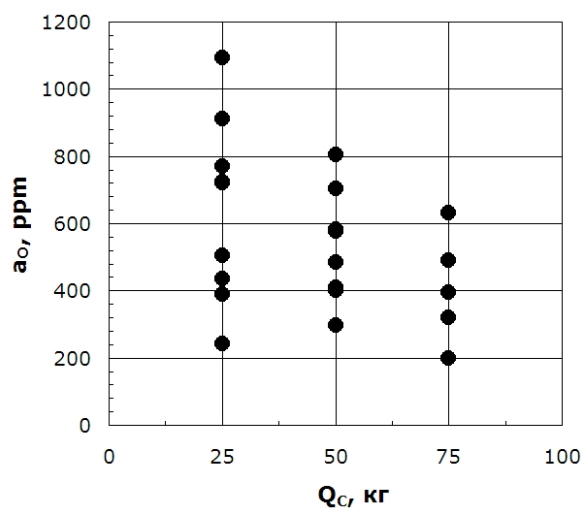


Рис. 12. Зависимость активности кислорода в металле от массы вдуваемого углерода.

Анализ изменения состава шлака в результате вдувания углеродсодержащих материалов показывал восстановление оксидов железа на ряде плавов. Величина убыли содержания  $\text{FeO}$  находилась в интервале от 0,43 до 13,00 %, что в пересчете на чистое железо составляет 0,33 и 10,11 %. В среднем количество восстановленного железа составит 28,2 кг/т шлака. В случае проведения за месяц 450 плавов экономия

железа составит 13 кг/т стали. При этом степень усвоения углерода колебалась в интервале от 6,2 до 16,2 %.

## Выпуск металла из печи

Вторичное окисление во время выпуска, является следствием процессов, протекающих в это время и включающих как взаимодействие расплава с атмосферой, так и замешивание в металл печного шлака. Последнее в условиях работы не происходило, поскольку технология плавки с жидким стартом предполагала оставление части металла и шлак в печи после выпуска.

Для описания вторичного окисления металла во время выпуска использовали результаты работы А. В. Тихонова<sup>1</sup>.

Полагали, что при истечении расплава из агрегата струя вначале имевшая строго цилиндрическую форму, в результате неравномерно приложенных гравитационных сил профилируется, то есть приобретает периодическую форму и начинает работать как струйный насос, внедряя в расплав атмосферный воздух. Объем газа, эжектируемого струей, можно рассчитать, зная профиль струи, высоту падения, диаметр сталевыпускного отверстия и количество металла в агрегате.

Объем единичного пузыря рассчитывали по уравнению:

$$V_g = 2\pi l (R_l^2 - R^2) \quad (6)$$

где  $R_l$  — радиус основания струи в нижней части деформированного участка;

$l$  — длина периода струи;

$R$  — радиус сталевыпускного отверстия.

Интенсивность поступления воздуха в расплав определяли из выражения:

$$J = \frac{W_{Me} V_g}{2\rho\pi R^2 l \tau} \quad (7)$$

где  $W_{Me}$  — масса металла в агрегате, кг;

$R$  — радиус струи в момент истечения струи из агрегата, м;

$l$  — длина струи, м;

$\rho$  — плотность стали, кг/м<sup>3</sup>;

$V_g$  — объем газа, поступившего в расплав, м<sup>3</sup>;

$\tau$  — продолжительность выпуска, сек.

---

<sup>1</sup>Тихонов А. В. «Прогнозирование и управление однородностью стального расплава с целью повышения стабильности химического состава литой заготовки», дисс. ... канд. тех. наук, Москва, 2001.

Тогда, количество воздуха поступающего в расплав во время выпуска определяется выражением:

$$Q = J\tau \quad (8)$$

Принимали, что весь кислород воздуха, эжектированный струей, переходит в металл. Тогда, в пересчете на содержание кислорода (21 %) в воздухе получаем:

$$Q_{O_2} = 0,21Q \quad (9)$$

Масса кислорода поступившего в металл равна:

$$m_{O_2} = M_{O_2} \frac{16}{1000} \quad (10)$$

Используя данную методику, оценили количество кислорода, поглощаемого расплавом за время выпуска. Установили, что существует очевидная связь между количеством кислорода в расплаве, рассчитанным как сумма кислорода в расплаве перед выпуском и поглощенного во время выпуска, и количеством угоревшего углерода (рис. 13), что можно рассматривать как свидетельство в пользу предложенного механизма вторичного окисления во время выпуска.

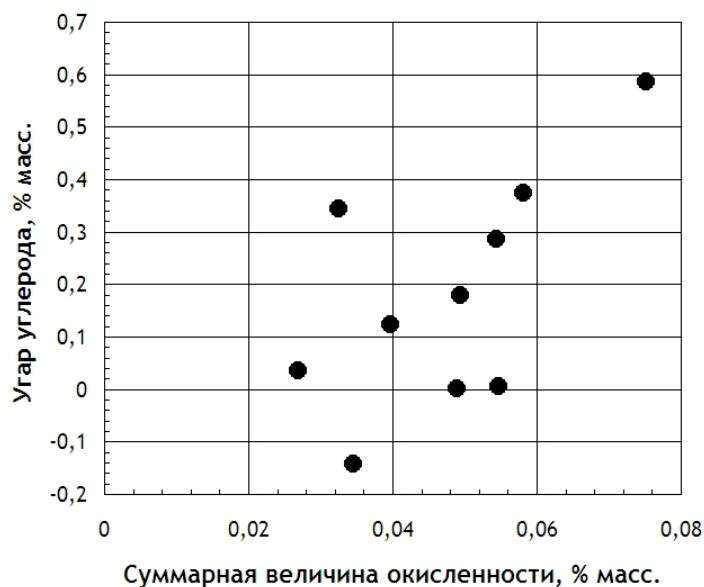


Рис. 13. Угар углерода во время выпуска в зависимости от суммарной окисленности расплава.

Эффект вторичного окисления может быть уменьшен за счет проведения мероприятий по защите струи металла, например путем создания вокруг струи защитной атмосферы, например, за счет  $CaCO_3$ , что, однако, сопровождается дополнительным снижением температуры.

Другим способом реализации данного технологического приема является применение углеродсодержащих материалов при условии, что будет ослаблен эффект бурного окисления углерода. Расчет показывает, что количество материала в пересчете на чистый углерод, необходимое для создания защитной атмосферы невелико и составляет для плавки, без учета теплового расширения продуктов реакции:

$$m_C = \frac{12}{22,4} V_{CO} = \frac{12}{22,4} 36,4 = 19,5 \text{ кг} \quad (11)$$

Для реализации предложенного мероприятия выбрали шунгит — чистый по примесям и недорогой материал, позволяющий не только защищать сталь от вторичного окисления, но и производить дополнительное комплексное раскисление.

Были проведены опытные и сравнительные плавки стали марки С38D и 1060. В ковш в процессе выпуска присаживали от 150 до 550 кг шунгита.

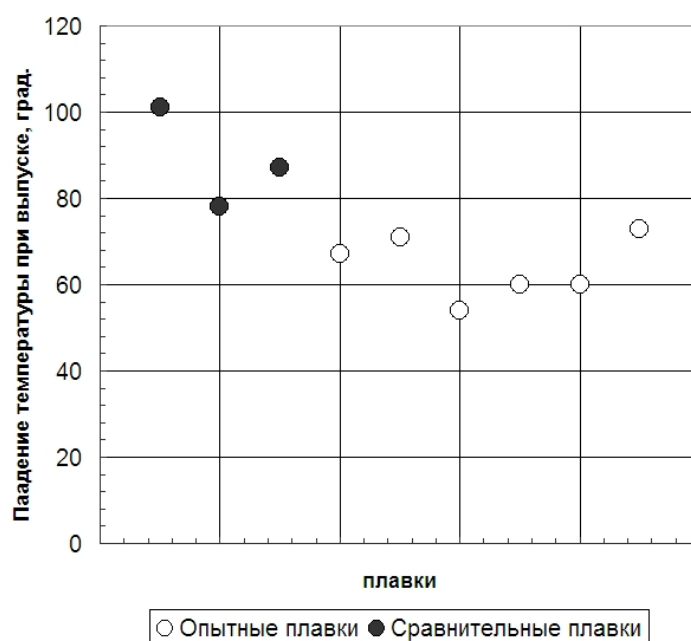


Рис. 14. Снижение температуры за время выпуска.

На опытных плавках снижение температуры было меньше, чем на сравнительных (рис. 14), наблюдалось пониженное содержание кислорода в металле (рис. 15) и пониженное содержание (FeO) в ковшевом шлаке.

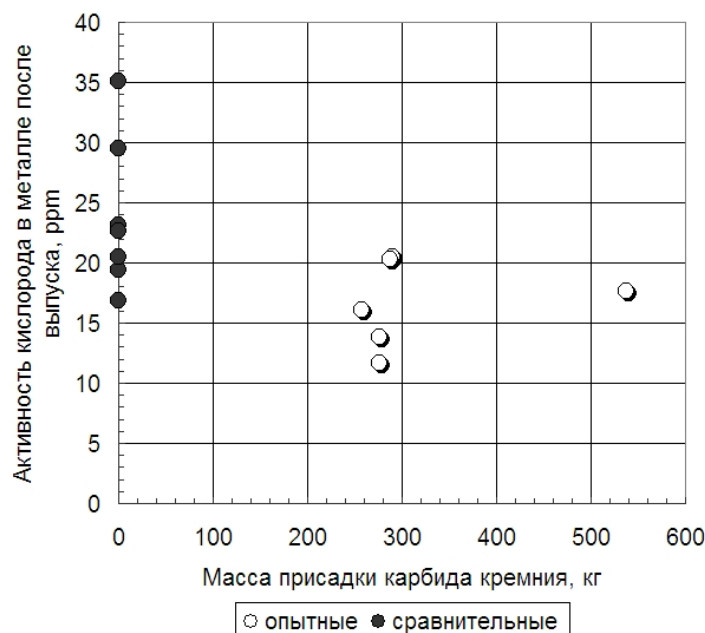


Рис. 15. Зависимость активности кислорода в металле от массы присадки карбида кремния.

## Внепечная обработка

Традиционно в рамках внепечной обработки решаются задачи глубокого рафинирования стали от растворенного кислорода и удаления из металла продуктов раскисления – неметаллических включений. Однако, как показали настоящие исследования с точки зрения достижения максимальных качественных показателей на этом этапе технологии наиболее актуальным является удаление продуктов раскисления и исключение протекания процессов вторичного окисления.

Статистический и физико-химический анализ технологии обработки стали на участке внепечной обработки позволил выявить наиболее значимые факторы, определяющие окисленность расплава, к числу которых прежде всего относятся присадки раскислителей и состав покровного шлака.

Свидетельством адекватности предложенного подхода является хорошая корреляция (рис. 16) между фактическим содержанием кислорода в расплаве на различных стадиях технологической цепочки и, рассчитанная на основании разработанной модели с учетом выявленных значимых факторов:

$$\ln[O]_{\tau} = k_1 \ln[O]_0 + k_2 \tau_{\text{УДМ}} + k_3 \tau_{\text{ПК}} [\ln(FeO) + \ln(MnO)] + k_4 \ln Q_{\text{присадки}} + A \quad (12)$$

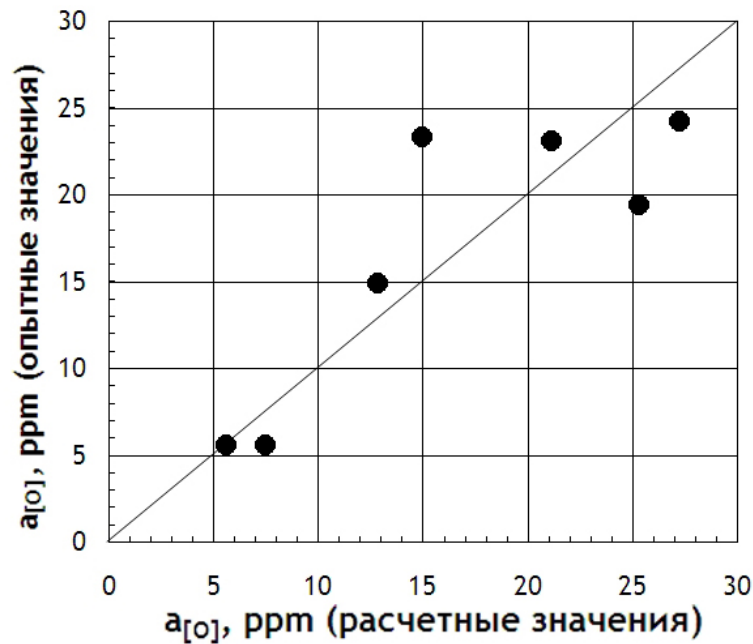


Рис. 16. Сравнение фактической концентрации активного кислорода и расчетных значений в течение всего цикла внепечной обработки.

Уравнение, описывающее поведение кислорода во время обработки на УДМ:

$$\ln[O]_{\tau} = \ln[O]_0 + \tau_{\text{УДМ}} + Q_{\text{присадки}} + A \quad (13)$$

И во время обработки на установке «печь-ковш»:

$$\ln[O]_{\tau} = \ln[O]_0 + \tau_{\text{ПК}} \cdot [\ln(FeO) + \ln(MnO)] + A \quad (14)$$

Таблица 4. Результаты расчета коэффициентов моделей

	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	A	r
УДМ	0,140	0,093		-0,039	3,573332	0,77
ПК	0,002		-0,595		2,997314	0,85
Весь цикл	-0,399	-0,577	-0,031	0,270	1,059544	0,92

## Основные выводы по работе

- 1) Исследован процесс получения кордового металла в условиях РУП «БМЗ», предполагающий выплавку стали в сверхмощных дуговых печах и рафинирование стали методами внепечной металлургии, включающие обработку на УДМ, установке «печь-ковш», и агрегате циркуляционного вакуумирования. Показано, что для повышения эффективности производства необходимо регулировать

содержание кислорода в металле начиная с выплавки и выпуска, т. е. снизив нагрузку на агрегаты внепечной обработки.

- 2) Выявлены значимые факторы, определяющие окисленность стали на всех этапах технологического процесса от выплавки до внепечной обработки, построены физически обоснованные модели, адекватно описывающие поведение кислорода в металле, которые могут быть использованы для анализа технологии и применены в системах АСУ ТП.
- 3) Предложенные мероприятия предполагают корректирование технологии внепечной обработки, основными задачами которой должно быть рафинирование стали от неметаллических включений — продуктов раскисления на предыдущих этапах технологии и предотвращение вторичного окисления, что предполагает регулирование состава покровного шлака.
- 4) Разработаны и апробованы мероприятия, позволяющие регулировать содержание кислорода в металле, включающие применение углеродсодержащих материалов во время плавки и выпуска, а также интенсифицирование процессов с помощью системы донной продувки инертными газами в ДСП.
- 5) Проанализирован процесс вторичного окисления стали во время выпуска и показано, что основную роль в этом процессе играет закачивание атмосферного кислорода в металл падающей струей металла. Показано, что эффективная защита от этого процесса может быть обеспечена при относительно небольших расходах газифицирующих материалов, например, шунгита.
- 6) Показано, что двухступенчатая схема поступления кислорода в металл при продувке ванны кислородной струей лучше описывает производственные результаты. Физико-химические модели, предложенные для описания поведения кислорода в расплаве на разных стадиях технологического передела, адекватно описывают содержание кислорода в металле.
- 7) Разработанные рекомендации были опробованы в промышленных условиях и показали улучшение качества кордового металла как по данным производителя, так и потребителя металла.



## Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих научных работах:

- 1) Kazakov S. V., Bizyukov P. V., Tchairev P. V. «Prediction of Chemical Composition of Melt During Secondary Treatment» // Symposium of Croatian Metallurgical Society «Materials and Metallurgy», Croatia, Zagreb, 2000 г., с. 211.
- 2) Казаков С. В., Бизюков П. В., Чайрев П. В., Филиппов В. В., Гуляев М. П., Эндерс В. В. «Интенсификация процесса выплавки стали в ДСП с помощью донной продувки инертным газом» // «Литье и металлургия» (Беларусь), № 1, 2002 г., с. 84-87.
- 3) Казаков С. В., Бизюков П. В., Чайрев П. В. «Десульфурация кордового металла при внепечной обработке» // «Черметметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», № 7, 2003 г., с. 1-3.
- 4) Казаков С. В., Бизюков П. В., Чайрев П. В., Гуляев М. П., Эндерс В. В., Гуненков В. Ю., Шевченко А. Д. «Особенности десульфурации кордового металла во время внепечной обработки в условиях РУП „БМЗ“» // Труды VII конгресса сталеплавыльщиков, Магнитогорск, 2003 г., с. 429-431.
- 5) Казаков С. В., Бизюков П. В., Чайрев П. В., Филиппов В. В., Гуляев М. П., Эндерс В. В. «Описание процессов массообмена в реальных металлургических системах» // Труды конференции «Современные проблемы металлургического производства», Волгоград, 2002 г., с. 28-30.
- 6) Гуненков В. Ю., Пивцаев В. В., Эндерс В. В., Гуляев М. П., Казаков С. В., Бизюков П. В. «Опыт производства кордовой стали без вакуумирования» // «Металлург», № 10, 2003 г., с. 42-44.
- 7) Казаков С. В., Гуненков В. Ю., Кушнерев И. В., Бизюков П. В., Маточкин В. А., Андрианов Н. В. «О возможности производства металла кордового качества без использования вакууматора на первой очереди РУП „БМЗ“» // «Металлургия XXI века». Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 20-летию Белорусского металлургического завода. 10-11 июня 2004 г. г. Жлобин, с. 25-28.
- 8) Казаков С. В., Гуненков В. Ю., Кушнерев И. В., Бизюков П. В., Маточкин В. А., Андрианов Н. В. «Принципы регулирования ко-

личества неметаллических включений в стали на примере кордового металла» // Труды 8-го конгресса сталеплавателей, Нижний Тагил, 2005 г., с. 306-310.