

КУЗНЕЦОВ МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАФИНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО
РАСПЛАВА ОТ АЗОТА И ВОДОРОДА С ЦЕЛЬЮ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ**

Специальность 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Металлургии стали и ферросплавов»
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Научный руководитель:

доцент каф. МСиФ НИТУ «МИСиС»,
кандидат технических наук

Котельников Георгий Иванович

Официальные оппоненты:

профессор НИТУ «МИСиС»,
доктор технических наук

Серов Геннадий Владимирович

Главный специалист дирекции по технологиям
ТМК, кандидат технических наук

Тютюник Сергей Владиславович

Ведущая организация:

Московский государственный вечерний
металлургический институт (МГВМИ)

Защита диссертации состоится «27» октября 2011 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу:

119049, Москва, Ленинский проспект, д. 6, корп. 1, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Автореферат диссертации размещен на официальном сайте Национального исследовательского технологического университета «Московский Институт Стали и Сплавов» - <http://misis.ru>. Объявление о защите размещено на официальном сайте Министерства образования и науки РФ - <http://mon.gov.ru>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просьба направлять по адресу: 119049, г.Москва, Ленинский проспект, д.4, Ученый Совет. Копии отзывов можно прислать на e-mail: makskuz@mail.ru.

Автореферат разослан «23» сентября 2011 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.132.02,
доктор технических наук, профессор



А.Е. Семин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы*

Высокая прочность, ударная вязкость и свариваемость низколегированной стали обеспечивается чистотой по содержанию газов в ней. Поэтому получение стали с низкой концентрацией азота и водорода является одной из главных задач технологии сталеплавильного производства.

Вопросы поведения газов рассмотрены в литературе по производству стали в мартеновских печах, кислородных конвертерах и маломощных дуговых сталеплавильных печах (ДСП). В то же время технология производства стали за последние десятилетия претерпела значительные изменения. Мартеновские печи повсеместно заменены дуговыми, совершенствуется конструкция ДСП, почти втрое увеличилась их удельная мощность, активно вводятся в эксплуатацию агрегаты внепечной обработки. Однако, исследования поведения газов при выплавке полупродукта в современной высокопроизводительной ДСП и последующей доводке его в агрегатах внепечного рафинирования только начинаются.

В литературе отсутствуют надежные методы расчета концентраций газов в стали, находящейся под слоем шлака. Нет адекватных алгоритмов и математических моделей, описывающих поведение азота при выплавке полупродукта в ДСП, которые учитывали бы структуру завалки, количество чугуна в ней, поглощение азота из плазмы дуги, из кислорода во время продувки и из лома при его расплавлении, а также удаление азота в ходе обезуглероживания. Не ясно как влияет режим плавления лома (прямое плавление дугой или растворение в ванне) и шлаковый режим на содержание азота в металле. Отсутствуют данные о влиянии способа выпуска из ДСП на содержание азота и водорода в металле. Такая ситуация затрудняет разработку технологии производства сталей с низким содержанием газов.

В связи с этим исследование процессов рафинирования металла от азота и водорода при выплавке низколегированной стали в высокомошной ДСП с использованием внепечной обработки является весьма актуальной задачей.

* Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/6832).

Цель работы

1. На основе теоретического анализа технологии производства стали разработать методику расчета установившихся фактических концентраций азота и водорода в металле, находящемся под слоем шлака. С использованием разработанной методики оценить влияние различных сталеплавильных технологий на уровень концентраций азота и водорода в стали.

2. Разработать математическую модель, описывающую поведение азота по ходу плавки стали в ДСП при совмещении процессов расплавления шихты и продувки ванны кислородом. Модель должна учитывать поступление азота из электрической дуги, плавящегося лома, вдуваемого кислорода и удаление азота при кипении ванны.

3. Разработка усовершенствованной технологии производства низколегированной стали, обеспечивающей получение заданных концентраций азота и водорода.

Научная новизна

1. Усовершенствован метод расчета установившихся фактических концентраций азота и водорода в металле для различных сталеплавильных процессов при наличии шлака на поверхности металлической ванны. Метод основывается на допущении локального равновесия между металлом и шлаком по азоту и водороду при различных значениях химического потенциала кислорода в этих фазах. Метод позволяет более точно оценивать фактические содержания азота и водорода в жидкой стали.

2. Экспериментально установлено, что уменьшение массы жидкой стали в ДСП приводит к снижению содержания азота в полупродукте за счет увеличения количества шлака и соответственно стабилизации перепада окисленности между металлом и шлаком. При этом содержание водорода в металле повышается за счет увеличения расхода извести и других шлакообразующих материалов.

3. Разработана новая модель поведения азота при выплавке полупродукта в ДСП. Модель позволяет прогнозировать содержание азота в зависимости от структуры завалки, плотности металлошихты и количества чугуна. Алгоритм учитывает поглощение азота из плазмы дуги, из кислорода и лома в ходе

плавления и продувки кислородом, а также рафинирование ванны от азота пузырями СО при обезуглероживании.

4. Уточнены представления о влиянии механизма плавления лома в современных высокомоощных дуговых сталеплавильных печах на содержание азота. Установлено, что прямое плавление лома дугой обеспечивает существенно более высокий уровень концентрации азота, чем растворение кусков лома в жидкой ванне, образующейся при оставлении части жидкого металла от предыдущей плавки, ранней заливке жидкого чугуна, использовании легковесной шихты.

5. Установлен эффект снижения количества поглощенного из окружающей среды и материалов азота и водорода в ходе выпуска полупродукта из дуговой сталеплавильной печи через эркер по сравнению с выпуском по желобу. Это, вероятно, объясняется изменением гидродинамических условий выпуска - снижением количества шлака, извести, ферросплавов, замешиваемых в объем металлической ванны.

Практическая значимость

1. Разработанные модели и полученные зависимости позволяют прогнозировать содержание азота и водорода в металле при выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи и по ходу внепечного рафинирования.

2. Достоверность полученных в данной работе выводов подтверждена разработкой и внедрением новых технологических решений на ОАО «Уральская Сталь» (акт внедрения прилагается), обеспечивших:

- содержание азота в стали перед выпуском из ДСП - не более 70 ppm;
- снижение концентрации водорода в готовой стали с 7-10 до 6-7 ppm;
- снижение беззаказных плавов по содержанию азота с 10 до 2 на 1000 плавов.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены на международной конференции «Технологии и оборудование для внепечной обработки и непрерывной разливки стали» (г. Москва, 2006), на 40, 41 и 43 конференциях молодых специалистов ОАО «Уральская Сталь» (г. Новотроицк, 2005, 2006, 2008), а также на технических совещаниях в ОАО «Уральская Сталь» (г. Новотроицк, 2007-2010).

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 191 странице машинописного текста и содержит введение, 3 главы, общие выводы по работе, 63 рисунка, 29 таблиц, 1 приложение. Список использованной литературы состоит из 128 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проанализированы требования к современным низколегированным сталям. Удовлетворение этих требований приводит к необходимости ограничения в стали вредных примесей, в том числе азота (до 80 ppm) и водорода (до 2 ppm).

Азот понижает пластические свойства стали, повышает хладноломкость и склонность стали к старению. Водород способствует образованию пористости, формированию раковин, пузырей, флокенов, развитию осевой неоднородности, приводит к охрупчиванию стали.

Результатом многочисленных исследований поведения газов при выплавке стали, выполненных В.И.Явойским, А.Н.Морозовым, В.А.Григоряном, А.Я.Стомахиным, А.Г.Свяжиным, Д.Янке, Н.Банненбергом, Б.Бергманом и др., являются следующие представления. В металл азот и водород вносятся с материалами и поступают из атмосферы печи. Удаление газов из металла происходит в процессе обезуглероживания за счет экстракции газов пузырьками СО. То есть, конечное содержание азота и водорода определяется соотношением двух процессов – поглощения и удаления газов. Для качественного анализа такой подход является вполне достаточным. В то же время количественные модели, адекватно описывающие получаемые фактические концентрации азота и водорода в стали, в настоящее время отсутствуют.

В литературе представлен метод расчета концентрации азота и водорода в металле, находящемся под слоем шлака. Этот метод, основанный на использовании термодинамики необратимых процессов, разработан А.Г.Пономаренко с соавторами. Согласно их представлениям наличие потока кислорода из газовой фазы через шлак в металл приводит к возникновению попутного потока водорода из газовой фазы в металл и противоположно направленного потока азота из металла в газовую фазу. Предельные

стационарные концентрации азота и водорода в металле под шлаком, полученные из этих представлений, описываются следующими уравнениями:

$$[N]_{пред} = [N]_{равн} \cdot \left(\frac{p_{O_2}^{г.ф.-шл}}{p_{O_2}^{шл-ме}} \right)^{-3/4}, \quad (1)$$

$$[H]_{пред} = [H]_{равн} \cdot \left(\frac{p_{O_2}^{г.ф.-шл}}{p_{O_2}^{шл-ме}} \right)^{1/4}, \quad (2)$$

где $[N]_{пред}$ и $[H]_{пред}$ - предельные содержания азота и водорода в металле под слоем шлака;

$[N]_{равн}$ и $[H]_{равн}$ - содержания азота и водорода в металле, равновесные с парциальными давлениями азота и водорода в газовой фазе;

$p_{O_2}^{г.ф.-шл}$ - парциальное давление кислорода на границе «газовая фаза-шлак»;

$p_{O_2}^{шл-ме}$ - парциальное давление кислорода на границе «шлак-металл».

Концентрации водорода, рассчитанные по формуле (2), достаточно близки к фактическим. В то же время, вычисленные по формуле (1) содержания азота в металле на несколько порядков отличаются от наблюдаемых на практике.

Поэтому необходимо дальнейшее развитие представлений о поведении газов в различных сталеплавильных процессах и разработка методов оценки фактических содержаний азота и водорода в металле для условий плавки под шлаком.

К настоящему времени процессы рафинирования жидкого металла от газов изучены применительно к технологии плавки стали в мартеновских печах, конвертерах и маломощных ДСП. Для условий плавки стали в современных высокомоощных дуговых электропечах требуется уточнить, как влияют на процессы рафинирования металлической ванны от азота и водорода состав и плотность металлошихты, наличие жидкого чугуна в шихте, чистота кислорода по азоту, расход углеродсодержащих материалов для вспенивания шлака, способ выпуска металла из печи.

На основании проведенного анализа литературных данных были сформулированы следующие задачи исследования.

1. Разработать метод количественной оценки установившихся концентраций азота и водорода в металле, находящемся под слоем шлака при различных значениях химического потенциала кислорода в металле и шлаке.

2. Исследовать влияние параметров технологии выплавки стали в ДСП на содержание азота и водорода.

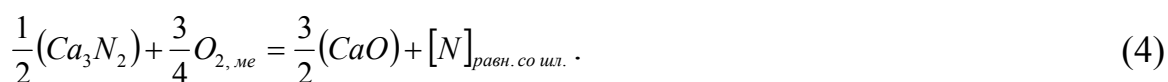
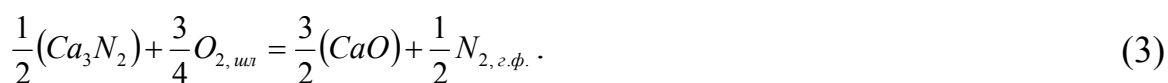
3. Разработать модель расчета содержания азота в стали при выплавке полупродукта в дуговой сталеплавильной печи, учитывающую состав и плотность металлошихты, расход чугуна, поглощение азота из плазмы дуги, из кислорода и лома в ходе плавления и продувки кислородом, а также рафинирование ванны от азота пузырями СО при обезуглероживании.

4. Разработать новые технологические решения для производства низколегированной стали, обеспечивающие получение требуемых содержаний азота и водорода.

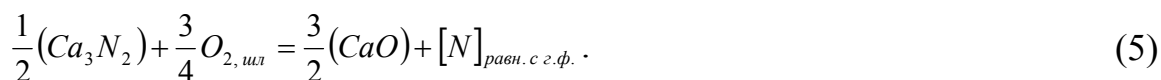
Во второй главе рассматривается методика расчета установившихся концентраций азота и водорода в стали, выплавка и рафинирование которой проводятся под слоем шлака.

В условиях открытой плавки существует постоянный поток кислорода из газовой фазы через шлак в металл. Парциальные давления кислорода в газовой фазе ($p_{O_2, г.ф.}$), в шлаке ($p_{O_2, шл.}$) и в металле ($p_{O_2, ме.}$) различны. Газовая фаза обычно является окислительной и $p_{O_2, г.ф.} > p_{O_2, шл.} > p_{O_2, ме.}$.

В результате контакта с газовой фазой азот растворяется в шлаке в нитридной форме (N^{3-}), например, в виде Ca_3N_2 . Нитриды в шлаке находятся под воздействием окислительного потенциала шлака ($p_{O_2, шл.}$), с одной стороны, и металла ($p_{O_2, ме.}$) – с другой:



Преобразуем реакцию (3), выразив давление азота в газовой фазе $p_{N_2, г.ф.}$ через активность азота растворенного в металле $[N]_{равн. с г.ф.}$. Для этого сложим (3) с реакцией $\frac{1}{2}N_{2, г.ф.} = [N]_{равн. с г.ф.}$; получим:



Запишем выражения констант равновесия для реакций (4) и (5):

$$K_4 = \frac{a_{[N]_{\text{равн. со шл.}}} \cdot a_{(CaO)}^{3/2}}{p_{O_2, \text{ме}}^{3/4} \cdot a_{(Ca_3N_2)}^{1/2}} \text{ и } K_5 = \frac{a_{[N]_{\text{равн. с з.ф.}}} \cdot a_{(CaO)}^{3/2}}{p_{O_2, \text{шл}}^{3/4} \cdot a_{(Ca_3N_2)}^{1/2}}$$

Примем, что активности компонентов шлака $a_{(CaO)}$ и $a_{(Ca_3N_2)}$ для реакций (4) и (5) при данных $p_{O_2, \text{шл}}$ и $p_{O_2, \text{ме}}$ являются постоянными величинами. Тогда для заданной температуры из равенства $K_4 = K_5$ следует:

$$a_{[N]_{\text{равн. со шл.}}} = a_{[N]_{\text{равн. с з.ф.}}} \cdot \left(\frac{p_{O_2, \text{ме.}}}{p_{O_2, \text{шл}}} \right)^{3/4}. \quad (6)$$

Величина $a_{[N]} = [N] \cdot f_N$. Сокращая коэффициент активности f_N , имеем:

$$[N]_{\text{равн. со шл.}} = [N]_{\text{равн. с з.ф.}} \cdot \left(\frac{p_{O_2, \text{ме.}}}{p_{O_2, \text{шл}}} \right)^{3/4}. \quad (7)$$

Следует отметить, что выражение (7) близко к формуле, полученной А.Г.Пономаренко. Отличие заключается в том, что в предлагаемой методике расчета в качестве фактора, определяющего концентрацию азота в металле, рассматривается перепад окисленности не между газовой фазой и металлом, а между шлаком и металлом.

Для удобства проведения расчетов парциальные давления кислорода в выражении (7) выразили через окисленности металла $a_{[O]}$ и шлака $a_{(FeO)}$:

$$[N]_{\text{равн. со шл.}} = [N]_{\text{равн. с з.ф.}} \cdot (K_{FeO})^{3/2} \cdot \left(\frac{a_{[O]}^{\text{факт}}}{a_{(FeO)}^{\text{факт}}} \right)^{3/2}, \quad (8)$$

где K_{FeO} - константа равновесия реакции $Fe_{(\text{ж})} + [O]_{1\% \text{ в } Fe} = FeO_{(\text{ж})}$.

При проведении расчетов по предложенной методике был учтен известный механизм переноса кислорода из газа в шлак и из шлака в металл:



Согласно этому механизму из двух молекул оксида железа (FeO), находящихся в объеме шлака, образуется три молекулы (FeO) в слое шлака, прилегающем к металлу; то есть окислительный потенциал шлака может возрасти относительно номинального в 1,5 раза.

При расчете содержания водорода в металле сделано допущение о существовании водорода в шлаке в форме $H_2O_{(шл)}$, которая под воздействием пониженного окислительного потенциала шлака $p_{O_2(шл)}$ может диссоциировать с образованием водорода растворенного в шлаке $H_{(шл)}$ по реакции:



Активность $H_{(шл)}$ можно выражать соответствующей равновесной величиной p_{H_2} , а активность $H_2O_{(шл)}$ - оценивать парциальным давлением p_{H_2O} в газовой фазе. Тогда диссоциацию $H_2O_{(шл)}$ можно описать эквивалентной реакцией:



Например, при $p_{O_2(шл)} = 5,2 \cdot 10^{-9}$ атм, что соответствует технологии выплавки в сверхмощной ДСП, степень диссоциации $H_2O_{(г)}$ составит $\alpha = 0,7$.

Растворение водорода в металле описывается следующей реакцией:



Содержание водорода в металле $[H]$, равновесное с давлением p_{H_2} в шлаке над металлом, которое образуется в результате диссоциации $H_2O_{(г)}$ по реакции (12), составит:

$$[H] = K_H \cdot \sqrt{p_{H_2}} \quad (14)$$

Величину p_{H_2} получим из выражения для константы равновесия реакции (12):

$$p_{H_2} = \frac{K_{12} \cdot (1 - \alpha) \cdot p_{H_2O(г)}}{p_{O_2(шл)}^{1/2}}, \text{ тогда растворимость водорода в металле под}$$

шлаком при давлении паров воды в газовой фазе $p_{H_2O(г)}$ равна:

$$[H]_{\text{равн. со шл.}} = K_H \cdot K_{12}^{1/2} \cdot \frac{(1 - \alpha)^{1/2} \cdot p_{H_2O(г)}^{1/2}}{p_{O_2(шл)}^{1/4}}, \quad (15)$$

где K_H - константа равновесия реакции $\frac{1}{2}\{H_2\} = [H]_{Fe}$;

K_{12} - константа равновесия реакции (12);

α - степень диссоциации $H_2O_{(г)}$ по реакции (12);

$p_{H_2O(г)}$ - парциальное давление паров воды в печной атмосфере;

$p_{O_{2, шл}}$ - парциальное давление кислорода в шлаке над металлом, которое рассчитывают из равновесия реакции $Fe_{(ж)} + \frac{1}{2}O_{2, шл} = (FeO)$.

Из уравнения (15) видно, что установившаяся концентрация водорода в металле под слоем шлака не зависит от перепада окисленности между металлом и шлаком. Она определяется парциальным давлением паров воды в печной атмосфере и активностью кислорода в шлаке.

Концентрация азота в металле в соответствии с уравнением (8) определяется величиной перепада окисленности между металлом и шлаком, а также парциальным давлением азота в печной атмосфере.

Для проверки новой методики были рассчитаны концентрации азота и водорода в стали для различных металлургических процессов (таблица 1). Парциальное давление паров воды в газовой фазе принято равным 0,02 атм, что соответствует абсолютной влажности воздуха при 20 °С.

Таблица 1 - Результаты расчета содержаний азота и водорода в металле под шлаком

Процесс	Содержание азота, ppm				Содержание водорода, ppm			
	Экспериментальные данные		методика А.Г.Пономаренко	новая методика	Экспериментальные данные		методика А.Г.Пономаренко	новая методика
	минимум	максимум			минимум	максимум		
Бессемеровский	120	250	$2,2 \cdot 10^{-4}$	250	2,8	5,3	9,4	3,4
Томасовский	100	200	$2,9 \cdot 10^{-4}$	70	2,2	7,2	8,6	3,1
Мартеновский (кислый)	40	80	$1,9 \cdot 10^{-5}$	30	1,5	5,5	19,6	3,4
Мартеновский (основной)	40	80	$5,7 \cdot 10^{-5}$	20	2	5	14,4	3,2
Кислородный конвертер	20	40	$1,4 \cdot 10^{-4}$	30	2	5,6	9,5	3,2
Калдо-процесс	10	30	$1,7 \cdot 10^{-4}$	30	2	5	7,9	2,9
ДСП (кислая)	80	160	$1,2 \cdot 10^{-4}$	60	2	3	12,6	3,5
ДСП основная (окисл.период)	30	80	$9,4 \cdot 10^{-5}$	60	3	7	10,9	3,3
ДСП(нержав. сталь)	80	250	$4,6 \cdot 10^{-4}$	90	4	8	49	4,5
ДСП сверхмощн.	40	100	$3,3 \cdot 10^{-4}$	68	3	5	5,7	3,1
ДСП «Consteel»	50	70	$1,3 \cdot 10^{-4}$	50	3	5	9,3	3,0
Вакуум при 65Па	40	60	$1,2 \cdot 10^{-8}$	20	0,5	2,0	2	0,6
Ковш-печь	40	100	$2,0 \cdot 10^{-6}$	100	5	12	70	3,4
ДСП основная (восст.период)	60	160	$1,1 \cdot 10^{-6}$	70	4	8	49	3,2

Содержания азота и водорода в металле, находящемся под шлаком, рассчитанные по новой методике, близки к значениям, наблюдаемым на практике. Это подтверждает достоверность разработанной схемы расчета.

Для предотвращения поглощения азота сталью из атмосферы необходимо иметь шлак с окислительным потенциалом, превышающим окислительный потенциал металла. Чем больше перепад окисленности между шлаком и металлом и меньше парциальное давление азота в газовой фазе, тем будет ниже конечная установившаяся концентрация азота в металле. Выравнивание значений окисленности металла и шлака приведет к приближению содержания азота к равновесному с печной атмосферой.

Для уменьшения содержания водорода в металле необходимо снижать парциальное давление водяного пара в газовой фазе и иметь небольшое количество умеренно раскисленного шлака.

В третьей главе проведено исследование технологических особенностей производства стали, оказывающих влияние на содержание азота и водорода в современных ДСП.

В разделе 3.1 проанализировано влияние массы металлошихты и толщины шлака в ДСП на содержание газов в стали. Для ДСП заданной вместимости количество шлака зависит от массы жидкого металла (рисунок 1).

На рисунке 1 представлены две крайних ситуации (а и б), которые отвечают пониженной и повышенной массе металлошихты. Глубина ванны печи H и в том, и другом случае одинакова. Величина H равна сумме глубины металлической ванны $h_{мет}$ и толщины шлака $h_{шл}$, то есть $H = h_{мет} + h_{шл}$. Отсюда, толщина вспененного шлака $h_{шл}$ (и соответственно его масса) зависит от уровня металла: $h_{шл} = H - h_{мет}$ и, соответственно, от массы жидкого металла и металлошихты. Поэтому при изменении массы металлошихты и уровня металла $h_{мет}$ происходит изменение толщины слоя шлака $h_{шл}$ и его количества.

Для определения влияния массы завалки и толщины слоя шлака на содержание азота и водорода провели 63 плавки с различной массой металлошихты.

Опытные плавки проведены в 120 т ДСП с эркерным выпуском на ОАО «Уральская Сталь». Металлошихта состояла из 60 % металлолома и 40 % жидкого чугуна. Массу загружаемой металлошихты варьировали в интервале от 113 до 140 т. Ванну продували технологическим кислородом (не менее 95 %

O₂) через 4 фурмы, установленные в стенах печи с интенсивностью до 3000 м³/ч через каждую фурму.

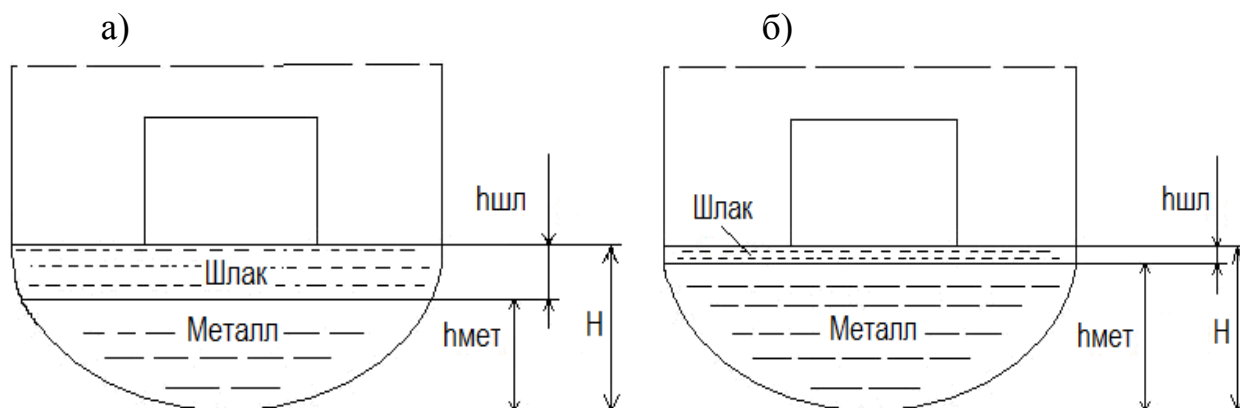


Рисунок 1 – Схема расположения металла и шлака в ДСП (а и б – ситуации максимального и минимального количества шлака, соответственно)

Пробы металла (1-я проба на установке ковш-печь - У КП) отбирали пробоотборниками. Содержание азота в пробе определяли на приборе LECO-TC600 методом плавления в потоке инертного газа (погрешность прибора – 0,025 ppm или 0,5 % отн.).

Для определения концентрации водорода в жидкой стали использовали систему Hydrys (погрешность измерений не более 0,5 % отн.). Замер содержания водорода производили в промежуточном ковше после разливки 50 % металла плавки.

В результате получены зависимости изменения содержаний азота и водорода в стали на плавках с различной массой металлошихты (рисунки 2 и 3).

Из рисунков 2 и 3 видно, что при снижении массы металлошихты со 140 до 113 т содержание водорода увеличилось с 6,8 до 8,7 ppm, а концентрация азота снизилась со 120 до 70 ppm. Рост содержания водорода при снижении массы металлошихты вызван увеличением расхода извести и, соответственно, ростом содержания H₂O в шлаке. Снижение содержания азота при повышении толщины и, соответственно, количества шлака обусловлено двумя факторами: отсутствием оголения металла и стабилизацией перепада окисленности.

Толщина шлака $h_{шл}$ равна разнице между величиной H (1350 мм) и $h_{мет}$. Для металлической ванны массой 140 т (включая 20 т остатка металла от предыдущей плавки) высота металла $h_{мет}$ составляет 1070 мм. Тогда, номинальная высота шлаковой ванны равна $1350-1070=280$ мм.

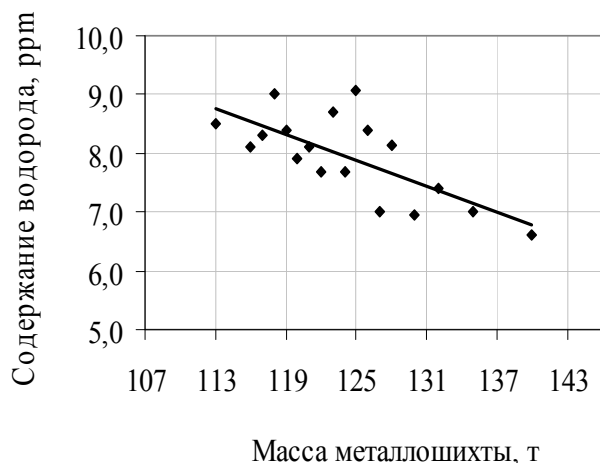


Рисунок 2 - Зависимость содержания водорода в стали (проба на МНЛЗ) от массы металлошихты

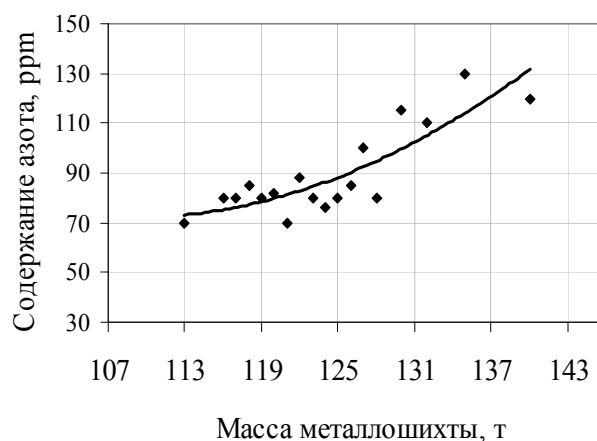


Рисунок 3 - Зависимость содержания азота в стали (1-я проба на УКП) от массы металлошихты

Толщина шлака при загрузке максимального количества металлошихты (140 т) составила 238 мм, а при минимальной завалке (113 т металлошихты) – 356 мм (рисунок 4).

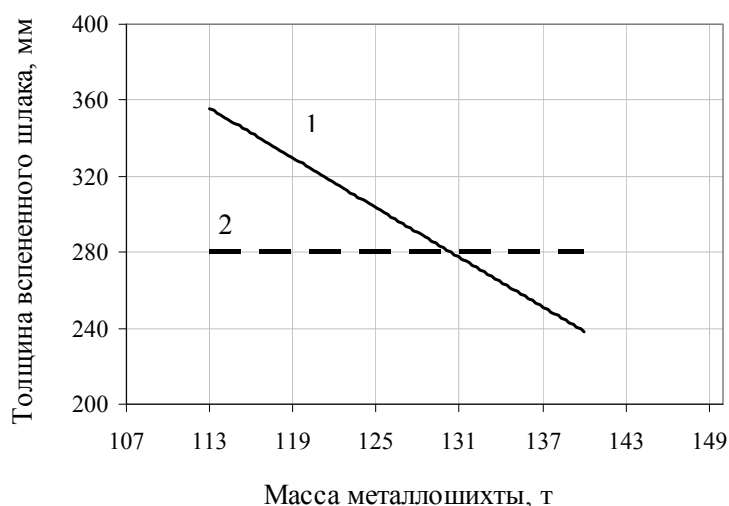


Рисунок 4 - Зависимость толщины вспененного шлака от массы металлошихты. 1-толщина вспененного шлака; 2-номинальная высота шлаковой ванны.

Кратность вспененного шлака (по отношению к массе жидкого металла в печи), заполняющего объем шлаковой ванны, при этом изменялась от 5,2 % при 113 т металлошихты до 2,9 % при 140 т.

В разделе 3.2 рассмотрено влияние электрической дуги на поглощение азота металлом при плавке стали в ДСП. Плавление отдельных кусков лома идет в условиях приближенных к плазменной плавке. Температура дуги составляет 3000-3500 °С, поэтому в опорной зоне дуги металл сильно

перегревается. Кроме того, при прямом воздействии дуги площадь ее опорной зоны соизмерима с площадью абсорбции азота из плазмы дуги, что приводит к повышенным содержаниям азота в металле. По мере расплавления шихты образуется общая жидкая ванна, что резко увеличивает зону десорбции азота и снижает плазменный эффект дуги.

Выполнены расчеты скорости поглощения азота металлом для двух режимов плавления лома в ДСП:

1) режим прямого плавления дугой отдельных кусков лома. Принято, что в этом случае на кусках лома образуется пленка жидкого металла. Эта пленка насыщается под дугой азотом и стекает в ванну печи;

2) режим растворения лома в жидком металле. В этом случае дуга горит на жидкую ванну, перегревает ее и обеспечивает растворение лома. При этом площадь абсорбции азота под дугой намного меньше общей площади ванны.

Скорость поглощения азота рассчитали по формулам:

$$\frac{d[N]}{d\tau} = \frac{\beta'_N \cdot S_{ab}}{V} \cdot ([N]^* - [N]) - \frac{\beta''_N \cdot (S - S_{ab})}{V} \cdot ([N] - K'' \cdot \sqrt{p_{N_2}}) \quad (14)$$

$$[N]^* = [N]_s + \frac{\beta''_N \cdot (S - S_{ab})}{\beta'_N \cdot S_{ab}} \cdot ([N]_s - [N]_G), \quad (15)$$

где β'_N, β''_N - коэффициенты массопереноса азота в металле в зоне абсорбции (2200 К) и десорбции (1900 К), соответственно;

S_{ab} - площадь зоны абсорбции - активного поглощения азота металлом под дугой;

S - суммарная площадь контакта металла с атмосферой печи;

$[N]^*$ - массовая доля азота на поверхности металла в опорной зоне дуги, равновесная с химическим потенциалом азота в плазме;

V - объем металла;

$[N]$ - текущее содержание азота в объеме расплава;

K''_N - константа равновесия реакции поглощения азота металлом при температурах зоны десорбции азота;

$[N]_s$ - стационарная концентрация азота в объеме расплава (расчет произведен для двух значений $[N]_s = 0,05 \%$ и $[N]_s = 0,10 \%$);

$[N]_G$ - равновесная массовая доля азота в зоне десорбции, равная $[N]_G = K''_N \cdot \sqrt{p_{N_2}}$.

Результаты расчета скорости поглощения азота металлом для двух режимов плавления представлены в таблице 2. В режиме «прямого» плавления лома дугами скорость поглощения азота металлом, находящимся в ореоле

плазмы, достигает 104-240 ppm/c. После образования начальной жидкой ванны с площадью $S \gg S_{ab}$ скорость поглощения азота снижается более чем в 200 раз.

Таблица 2 – Скорость поглощения азота металлом при плавке лома в ДСП

Режим плавления	S, см ²	S _{ab} , см ²	V, см ³	d[N]/dτ, ppm/c	
				[N] _s = 0,05 %	[N] _s = 0,1 %
Дуга «горит» на кусок твердого лома	600	300	30*	104	240
Дуга «горит» на жидкую ванну	5600	600	168000	0,426	0,958

* - отвечает пленке жидкого металла на куске лома.

Полученные данные согласуются с результатами работы дуговых печей ряда предприятий - ОЭМК, печи Consteel, ММК и Уральская Сталь. Здесь практически на протяжении всей плавки электрические дуги «горят» на жидкую ванну и лом растворяется в перегретом металле. При этом содержание азота в металле перед выпуском из ДСП составляет 30-50 ppm, что существенно ниже обычных концентраций азота в ДСП, составляющих от 70 до 120 ppm.

Определено содержание азота в металле после расплавления (без учета дегазации при обезуглероживании) при шихтовке плавок тяжеловесным и легковесным ломом для различных режимов его плавления. Расчет проведен для ДСП вместимостью 120 т с высотой рабочего пространства (от подины до свода) равной 2,8 м и мощностью трансформатора 95 МВА. Плавка ведется с использованием 10 т остатка жидкого металла в печи от предыдущей плавки. Масса металлошихты – 110 т.

Предположили, что лом, находящийся под дугами, плавится в режиме прямого плавления, а на периферийных участках печи – в режиме растворения. Диаметр общего «колодца», образованного при расплавлении тремя электродами, приняли равным 3,0 м. Расстояние, которое электрическая дуга проходит вниз, расплавляя лом завалки и подвалки, составляет 2,4 м. Объем пройденного дугами пространства равен 17 м³.

С учетом насыпной плотности легковесного лома 0,6 т/м³ и тяжеловесного лома 1,5 т/м³, определили массу расплавленного под дугами металла:

- для легковесного лома - $M_{дуг} = 17 \cdot 0,6 = 10,2$ т;
- для тяжеловесного лома - $M_{дуг} = 17 \cdot 1,5 = 25,5$ т.

Содержание азота после расплавления рассчитали по формуле:

$$[N] = (M_{\text{дуг}} \cdot [N]_{\text{дуг}} / 100 + M_{\text{лом}} \cdot [N]_{\text{лом}} / 100) / M_{\text{мет}} \cdot 100\%, \quad (16)$$

где $M_{\text{дуг}}$ - масса металла, расплавленного в режиме прямого плавления дугой, т;

$[N]_{\text{дуг}}$ - содержание азота в металле, расплавленном в режиме прямого плавления дугой ($[N]_{\text{дуг}} = 0,05$), %;

$M_{\text{лом}}$ - масса металла, расплавленного в режиме растворения (включая «болото»), т;

$[N]_{\text{лом}}$ - содержание азота в металлоломе; принято равным 0,010, %;

$M_{\text{мет}}$ - общая масса плавки - 120 т.

Для шихты из легковесного лома конечное содержание азота в металле составило $[N]_{\text{кон}} = 126 \text{ ppm}$, для шихты из тяжеловесного лома – $[N]_{\text{кон}} = 185 \text{ ppm}$. На практике из-за параллельно протекающего обезуглероживания концентрации азота в металле после расплавления заметно ниже.

Экспериментальные плавки, проведенные в ДСП-10 с использованием только тяжеловесного лома без обезуглероживания, показали, что содержание азота в металле после расплавления лома составило 230-290 ppm, это удовлетворительно коррелирует с результатами расчета.

В разделе 3.3 проанализировано поведение азота при совмещении процессов расплавления и обезуглероживания в ДСП.

Обезуглероживание металла в высокомошных ДСП начинается после расплавления 30-40 % лома. При этом крупные куски шихты плавятся значительно дольше легковесного лома. В результате азот, поступающий в ванну из доплавляемого лома, может не успеть удалиться, так как ближе к концу плавки интенсивность обезуглероживания снижается. Оценим прирост содержания азота в металле за счет поступления его из доплавляемого лома.

Анализ промышленных плавок показал, что при наличии в шихте крупных кусков лома температура металла в конце плавки в течение 5-7 мин не изменяется, несмотря на то, что печь работает и расходует около 4000 кВт·ч электроэнергии. С учетом теплоты плавления железа 75,55 кВт·ч/т и общего коэффициента полезного действия ДСП равного 0,45 расчетная масса доплавляемого лома составляет $4000 \cdot 0,45 / 75,55 = 24 \text{ т}$.

Общая масса металлошихты составляет 130 т. Примем, что в обезуглероженном металле (106 т) содержание азота составляет 55 ppm, а в

нерасплавленном ломе (24 т) - 100 ppm. Тогда конечное содержание азота в металле после обезуглероживания и доплавления оставшихся 24 т лома составит:

$$[N]_{\text{кон}} = \frac{m_N^{\text{кон}}}{M_{\text{мет}}^{\text{кон}}} \cdot 100\% = \frac{106 \cdot 0,0055 + 24 \cdot 0,010}{130} = 0,0063 \% \text{ или } 63 \text{ ppm}. \quad (17)$$

где $m_N^{\text{кон}} = m_N^{\text{исх}} + m_N^{\text{допл}}$ - общая масса азота, т;

$M_{\text{мет}}^{\text{кон}}$ - общая масса жидкого металла, т.

Таким образом, содержание азота за счет доплавления 24 т тяжеловесного лома в последние минуты плавки увеличивается с 55 до 63 ppm. Прирост содержания азота составляет 8 ppm или 15 % (отн.) от исходного содержания.

Существующий метод расчета удаления газов при обезуглероживании по уравнению Геллера предполагает экстракцию азота и водорода пузырьками СО из полностью расплавленной ванны. Однако содержание азота, рассчитанное этим способом (3 ppm), сильно отличается от фактически наблюдаемых на практике концентраций: от 30 до 50 ppm при использовании технического кислорода и от 70 до 100 ppm – технологического.

В связи с этим разработана модель деазотации расплава, учитывающая совмещение обезуглероживания и плавления металла в ДСП. Особенностью данной модели является учет поглощения азота (из плазмы дуги, из кислорода и лома в ходе плавления и продувки), а также процессов рафинирования ванны от азота пузырьками СО при обезуглероживании.

Отработка модели была проведена применительно к технологии плавки на ОАО «Уральская Сталь». В соответствии с новой моделью обезуглероживание расплава начинается не после расплавления всей металлошихты (130 т), а значительно раньше – при наличии 30 т расплавленного металла (26 т чугуна и 4 т лома).

Расчет массы металла, содержаний углерода и азота производится с шагом равным одной минуте. Количество окисленного на каждом шаге углерода $\Delta[C]$ рассчитывается по формуле:

$$\Delta[C] = \frac{\frac{12}{11,2} \cdot q_{O_2} \cdot K_{\text{исп}} \cdot 100}{g_{\tau}}, \quad (18)$$

где q_{O_2} - интенсивность продувки кислородом, м³/мин;

$K_{\text{исп}}$ – коэффициент использования кислорода (принят равным 0,75);

g_τ - масса жидкого металла в текущий момент времени τ , т.

Массу жидкого металла g_τ , содержание углерода $[C]_\tau$ и азота $[N]_\tau$ в текущий момент времени τ определяли следующим образом:

$$g_\tau = g_{\tau-1} + j \quad (19)$$

$$[C]_\tau = \frac{[C]_{\tau-1} \cdot g_{\tau-1}}{g_\tau} - \frac{100\% \cdot q_{O_2}}{g_\tau} \cdot \frac{12}{11,2} + \frac{j \cdot [C]_{\text{лом}}}{g_\tau}. \quad (20)$$

$$[N]_\tau = 1/(\Delta[C]_\tau \cdot \left(\frac{28}{12}\right) \cdot \left(\frac{1}{K^2}\right) \cdot \frac{1}{P} + \frac{1}{[N]_{\tau-1}}) + \frac{j \cdot 0,01}{g_\tau}. \quad (21)$$

где $g_{\tau-1}$ - масса жидкого металла в момент времени $\tau-1$, т;

j – скорость плавления лома, кг/мин;

$[C]_{\tau-1}$ и $[N]_{\tau-1}$ - содержание углерода и азота в металле в предыдущий момент времени $\tau-1$, %;

$[C]_{\text{лом}}$ - содержание углерода в ломе, % (принято равным 0,2 %);

K – константа равновесия реакции $\frac{1}{2}N_2 = [N]$;

P – общее давление в печи, атм.

Некоторые результаты расчета по новой модели представлены в таблице 3. Из таблицы 3 видно, что содержание азота в полупродукте ДСП после обезуглероживания техническим кислородом (99,5 % O_2) составляет 49 ppm, при использовании технологического кислорода (95 % O_2) - 123 ppm. Фактическое содержание азота в металле соответственно составляет от 30 до 50 и от 70 до 100 ppm. Таким образом, расчеты по новой модели дают возможность более точного прогнозирования содержания азота в металле после расплавления и обезуглероживания в современной ДСП.

Таблица 3 – Результаты расчета содержания азота в металле после расплавления и обезуглероживания в ДСП

Тип проведения плавления и обезуглероживания	Содержание азота после обезуглероживания, ppm	
	расчетные	фактические*
Раздельное плавление и обезуглероживание	3	30-50
Совмещенное плавление и обезуглероживание. Использован технический кислород (99,5 % O_2)	49	30-50
Совмещенное плавление и обезуглероживание. Использован технологический кислород (95 % O_2)	123	70-100

*По данным плавов в ДСП-120 на ОАО «Уральская Сталь».

В разделе 3.4 исследовано влияние состава шихты в ДСП на содержание азота в стали при двух вариантах шихтовки плавов: использование 100 % твердой металлошихты и применение в шихте до 50 % жидкого чугуна.

По варианту плавки на твердой завалке было проведено 178 опытных плавов низколегированных марок стали. Загрузку шихты производили двумя корзинами. Продувку металла техническим кислородом (не менее 99,5 % O_2) осуществляли с интенсивностью до 3200 м³/час. Отбор проб для определения азота производили после выпуска металла из ДСП на У КП (первая проба). Оценка стандартного отклонения единичного измерения содержания азота определенная по всему массиву плавов составила 12 ppm. Долю легковесного лома на исследуемых плавках изменяли от 30 до 55 %, среднего лома – от 7 до 27 %, тяжеловесного – от 10 до 25 %, твердого чугуна – от 12 до 21 % от общей массы металлошихты. При изменении доли каждого вида лома соотношение остальных компонентов практически не изменялось.

Из рисунков 5 и 6 видно, что с увеличением доли легковесного лома в шихте ДСП с 30 до 55 % концентрация азота в стали снижается с 75 до 63 ppm. Рост доли твердого чугуна в шихте с 12 до 21 % приводит к уменьшению массовой доли азота с 80 до 65 ppm. Увеличение доли тяжеловесного лома в шихте ведет к росту содержания азота в металле.

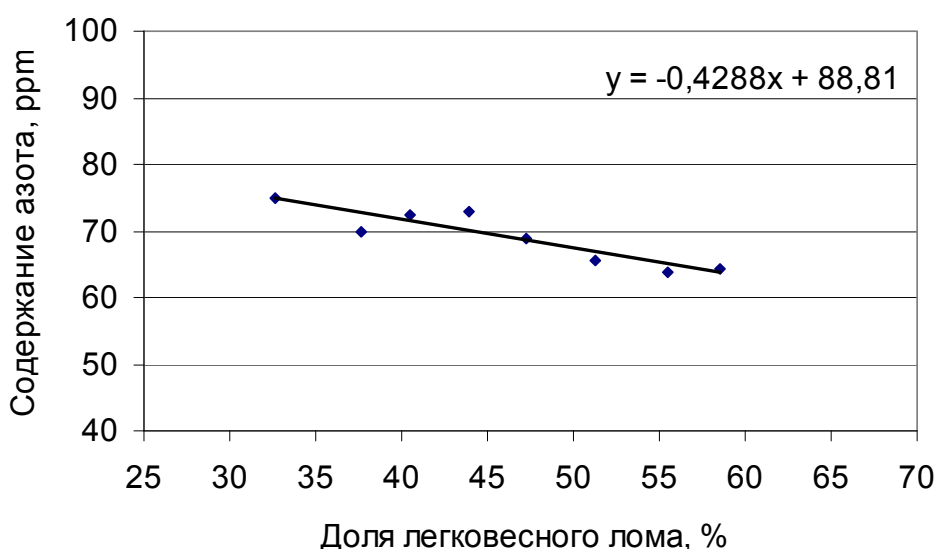
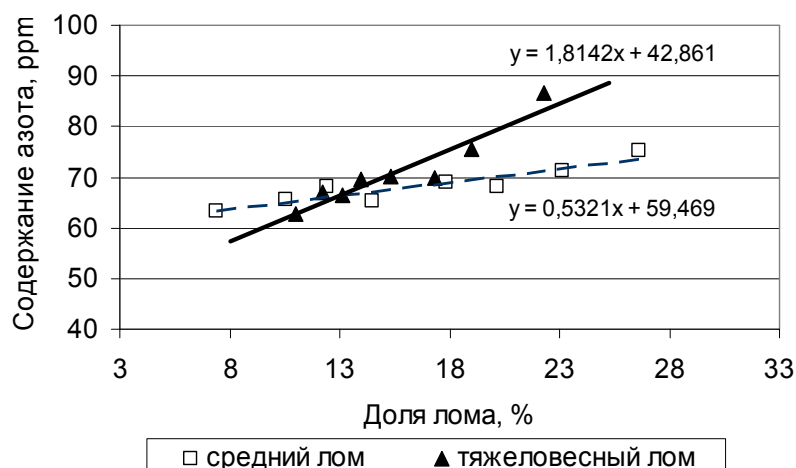


Рисунок 5 – Зависимость содержания азота в стали от доли легковесного лома в шихте

а)



б)

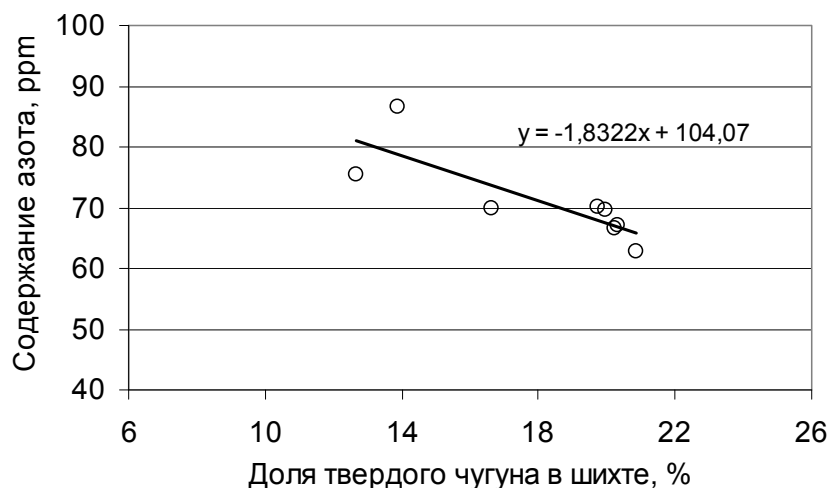


Рисунок 6 – Зависимость содержания азота в стали от доли среднего и тяжеловесного лома (а) и количества твердого чугуна (б).

Изменение содержания азота в стали при увеличении доли различных видов металлошихты на 1 % представлено на рисунке 7.

С учетом вклада каждого из компонентов шихты получена формула для оценочного расчета концентрации азота в металле после выпуска:

$$[N] = [N]_0 - 0,43X_{\text{легк}} + 0,53X_{\text{средн}} + 1,81X_{\text{тяж}} - 1,83X_{\text{чуг}}, \quad (22)$$

где $X_{\text{легк}}$, $X_{\text{средн}}$, $X_{\text{тяж}}$, $X_{\text{чуг}}$ – массовые доли легковесного, среднего, тяжеловесного лома и твердого чугуна в шихте, соответственно, %;

$[N]_0$ – средняя концентрация азота в завалке, принятая равной 80-100 ppm.

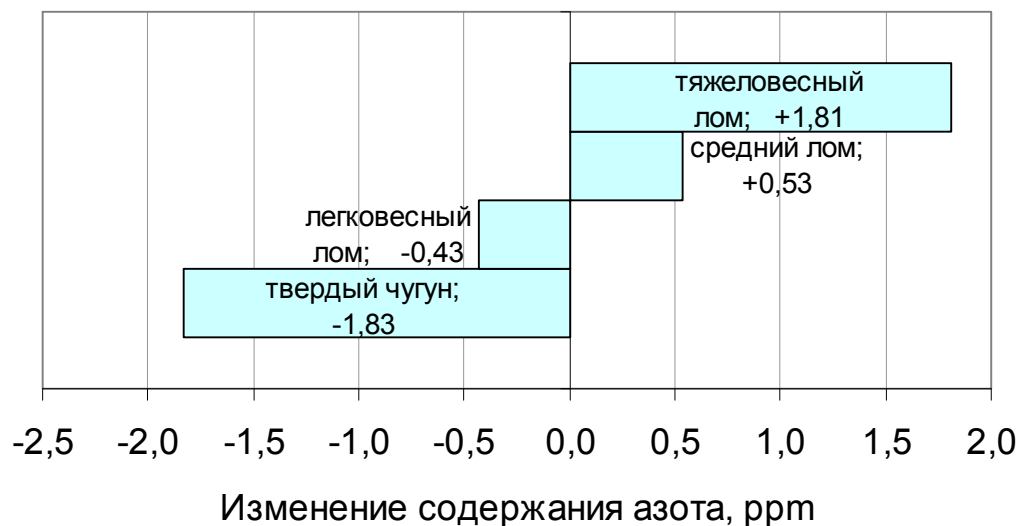


Рисунок 7 – Изменение содержания азота в стали при увеличении доли различных видов металлошихты (легковесного, среднего, тяжеловесного лома и твердого чугуна) в завалке на 1 %

Несколько более точно содержание азота в металле ($[N]$, ppm) перед выпуском из ДСП описывается зависимостью от средневзвешенной плотности загруженного лома:

$$[N] = 0,0113 \cdot \rho_{\text{лома}} - 0,0016, \quad (23)$$

где $\rho_{\text{лома}}$ – средневзвешенная плотность лома, т/м^3 (формула 24).

$$\rho_{\text{лома}} = \frac{(X_{\text{легк}} + X_{\text{средн}} + X_{\text{тяж}})}{\left(\frac{X_{\text{легк}}}{0,6} + \frac{X_{\text{средн}}}{1,0} + \frac{X_{\text{тяж}}}{1,5}\right)}, \quad (24)$$

Формула (23) справедлива при доле чугуна в шихте до 20 %.

Варьируя состав металлошихты, определили новый вариант шихтовки для получения требуемой концентрации азота - 18 % чугуна, 42 % легковесного лома, 20 % среднего и 20 % тяжеловесного лома. Использование предложенного варианта завалки вместо базового (33 % легковесного лома, 22 % среднего и 45 % тяжеловесного лома) обеспечило повышение доли плавов с содержанием азота не более 70 ppm с 20 до 50 %.

Изменение состава металлолома оказывает существенное влияние на содержание азота при использовании твердой металлошихты. При добавке в шихту до 35 % жидкого чугуна концентрация азота в полупродукте снижается с 75 до 47 ppm (рисунок 8). Дальнейшее увеличение доли жидкого чугуна в шихте до 50 % на содержание азота уже не влияет.

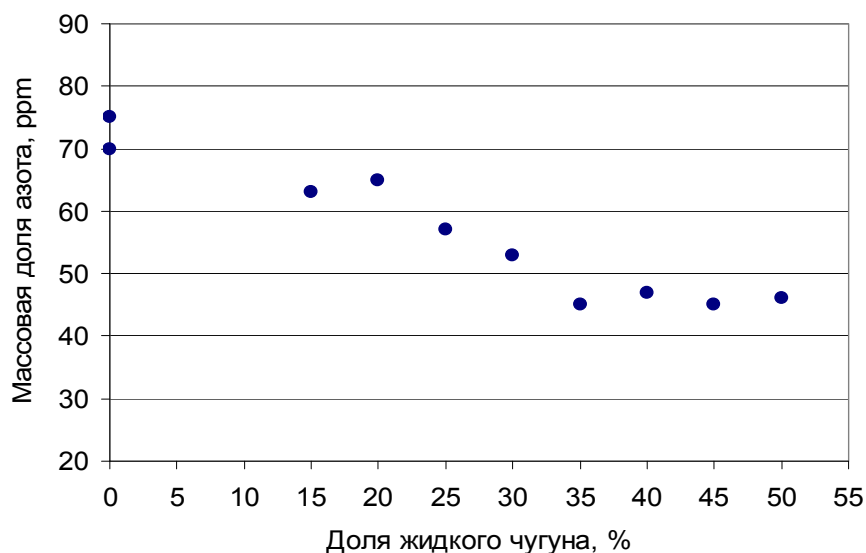


Рисунок 8 – Влияние доли жидкого чугуна в шихте ДСП на содержание азота в стали.

В разделе 3.5 установлено изменение содержаний азота и водорода в стали при выпуске металла из ДСП по желобу и через эркер.

Анализ технологии выпуска показывает, что при использовании желоба струя менее компактная, входит в ковш под углом и замешивает куски извести вглубь металла. При этом гидраты извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ должны диссоциировать с образованием оксидов кальция и паров воды. В связи с тем, что температура диссоциации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ составляет около 550°C из кусков извести, находящихся в объеме металла, выделяются пары H_2O с давлением более 1 атм ($\{\text{H}_2\text{O}\}_{1\text{ атм}} = 2[\text{H}] + [\text{O}]\text{}$). Водород из H_2O в этом случае должен эффективно усваиваться металлом.

Выпуск металла из печи через эркер происходит в 2-3 раза быстрее, чем по желобу, однако, струя металла при эркерном выпуске вертикальная и высота падения струи меньше. Такая струя практически не замешивает шлакообразующие в объем металла. В связи с этим предположили, что содержание газов в стали при эркерном выпуске должно быть меньше.

Для проверки сделанных предположений было проведено 80 плавов. Плавки проводились в ДСП с эркерным выпуском и выпуском по желобу. Для каждого типа выпуска использовали два варианта наведения шлака. Вариант 1 предусматривал присадку 50 % извести в ковш во время выпуска, остальное количество извести вводили на УКП, в варианте 2 – шлакообразующие на выпуске не присаживали, всю известь отдавали на УКП (таблица 4).

Таблица 4 - Технологические параметры при различных типах выпуска

Тип выпуска	Присадка шлакообразующих	Кол-во плавок, шт	Среднее содержание водорода в стали, ppm	Прирост содержания азота на выпуске, ppm			Расход извести, кг			Продолжительность выпуска, мин	Степень десульфурации металла на выпуске, %
				min	max	среднее	на выпуске	на У КП	всего		
жёлоб	У КП	20	6,7	10	40	20	0	1571	1571	8	0
	выпуск и У КП	23	7,5	10	40	16	706	837	1543	8	22
эркер	У КП	17	6,7	0	20	7	0	1509	1509	3	0
	выпуск и У КП	20	6,8	0	20	5	990	613	1603	3	0

Из таблицы 4 видно, что выпуск металла из ДСП по желобу с присадкой извести в ковш приводит к более высоким содержаниям водорода, чем при использовании эркера.

При использовании эркера прирост содержания азота за время выпуска составляет 5-7 ppm, что в 3-4 раза меньше, чем при выпуске по желобу – 16-20 ppm. Десульфурация металла при эркере отсутствует, что подтверждает предположение о слабом перемешивании металла со шлаком и отсутствии эффекта замешивания извести в металл при эркерном выпуске.

ВЫВОДЫ

1. Усовершенствован метод расчета установившихся фактических концентраций азота и водорода в металле для различных сталеплавильных процессов при наличии шлака на поверхности металлической ванны. Метод основывается на допущении локального равновесия между металлом и шлаком по азоту и водороду при различных соотношениях химического потенциала кислорода в этих фазах. Использование нового метода позволяет значительно снизить погрешность расчетов содержания азота в металле под шлаком.

2. Установлено, что с уменьшением массы металлошихты и повышением толщины вспененного шлака с 238 до 356 мм концентрация азота снижается с 0,012 до 0,007 % (на 41 % отн.), а содержание водорода увеличивается с 6,8 до 8,7 ppm.

3. Проведено исследование поглощения азота металлом при плавлении лома электрической дугой в ДСП. Показано, что расплавление тяжеловесного лома в ДСП-10 в режиме прямого плавления дугами без применения кислорода приводит к росту концентрации азота в металле с 0,010-0,012 до 0,023-0,029 %. Установлено, что скорость поглощения азота металлом значительно снижается при переходе от режима «прямого» плавления дугами крупных кусков шихты к режиму, когда дуга «горит» на жидкую ванну (остаток металла от предыдущей плавки, заливка жидкого чугуна, использование легковесной шихты). Конечная концентрация азота при плавлении лома в режиме растворения составляет 0,005-0,008 %.

4. Разработана новая модель поведения азота при выплавке полупродукта в ДСП. Алгоритм учитывает процессы поглощения азота (из плазмы дуги, из кислорода и лома в ходе плавления и продувки), а также рафинирование ванны от азота пузырями СО при обезуглероживании. Модель учитывает совмещение процессов расплавления лома и обезуглероживания расплава.

Результаты расчетов, выполненные с использованием новой модели, заметно ближе к фактическим значениям содержания азота в стали в ДСП, чем рассчитанные по существующей методике. Показано, что прирост содержания азота в металле из-за доплавления нерасплавленного лома в конце плавки достигает 15 %.

5. Для ДСП, работающей на твердой завалке, показано, что увеличение в шихте легковесного лома и твердого чугуна снижает содержание азота. Повышение плотности лома, доли среднего и тяжеловесного лома приводит к росту концентрации азота. Разработана статистическая модель для прогноза содержания азота в полупродукте ДСП в зависимости от доли легковесного лома $X_{\text{легк}}$, среднего $X_{\text{средн}}$, тяжеловесного $X_{\text{тяж}}$ и чугуна $X_{\text{чуг}}$.

$$[N] = [N]_0 - 0,43X_{\text{легк}} + 0,53X_{\text{средн}} + 1,81X_{\text{тяж}} - 1,83X_{\text{чуг}}.$$

С использованием модели разработан новый вариант завалки (18 % чугуна, 42 % легковесного лома, 20 % среднего и 20 % тяжеловесного), использование которого обеспечило повышение доли плавов с содержанием азота не более 70 ppm с 20 до 50 %.

При использовании в шихте до 35 % жидкого чугуна концентрация азота в полупродукте снижается с 75 до 47 ppm. При дальнейшем увеличении доли жидкого чугуна в шихте до 50 % содержание азота не изменяется.

6. Проведено исследование влияния технологии выпуска металла из ДСП на содержание азота и водорода в стали. Выпуск металла из ДСП по желобу

приводит к повышению содержания водорода в стали с 6,7 до 7,5 ppm за счет замешивания кусков извести в объем металла. При использовании эркера концентрация водорода в металла за время выпуска не увеличивается.

Переход от выпуска из ДСП по желобу к эркерному снижает количество поглощаемого азота в 3 раза с 16-20 до 5-7 ppm вне зависимости от вариантов присадки извести.

7. На основании результатов, полученных в диссертационной работе, сформулированы основные требования и положения новой технологии производства трубных сталей, обеспечивающей снижение содержания азота и водорода. Получен акт внедрения разработанных мероприятий, в котором подтверждено достижение следующих результатов:

- содержание азота в стали перед выпуском из ДСП - не более 70 ppm;
- снижение концентрации водорода в готовой стали с 7-10 до 6-7 ppm;
- снижение безаказных плавов по содержанию азота с 10 до 2 на 1000 плавов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кузнецов М. С., Якушев Е. В., Кулагин С. А., Котельников Г. И., Семин А. Е., Косырев К. Л., Кулиш Р. С. Влияние массы металлошихты и толщины шлака на технологию выплавки стали в дуговой печи. // Электromеталлургия №2, 2010.

2. Е.В.Якушев, В.В.Зырянов, Б.М.Коровин, М.С.Кузнецов. Влияние чистоты используемого для продувки кислорода, на содержание азота в стали, выплавленной в высокомоощных ДСП ОАО «Уральская Сталь». // Металлург №2, 2010.

3. Кузнецов М. С., Якушев Е. В., Кулагин С. А., Котельников Г. И., Семин А. Е., Косырев К.Л., Ченгелия Р. К. Влияние состава шихты на содержание азота в металле при выплавке стали в ДСП на твердой завалке. // Электromеталлургия №1, 2011.

