

КУШНЕРОВ ИЛЬЯ ВАСИЛЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ  
РАФИНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА  
ОТ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ  
ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА КОРДОВОЙ СТАЛИ

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

Автореферат  
диссертации на соискание  
ученой степени кандидата  
технических наук

Москва – 2007

Диссертационная работа выполнена на кафедре металлургии стали ферросплавов Государственного технологического университета Московского института стали и сплавов.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Казаков Сергей Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Смирнов Николай Александрович

кандидат технических наук Сафронов Александр Афанасьевич

Ведущее предприятие: ОАО ММЗ «Серп и молот»

Защита состоится «31» мая 2007 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д.212.132.02 при Государственном технологическом университете Московском институте стали и сплавов по адресу: 119049, Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, 6, ауд. А-305

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного технологического университета Московского института стали и сплавов.

Автореферат разослан «27» апреля 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета,  
доктор технических наук,  
профессор

Семин А.Е.

# **1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

## **Актуальность работы**

Современная технология производства черных металлов предполагает максимальную интенсификацию процессов плавления, вследствие чего расплав в конце плавки оказывается пересыщенным кислородом. Ввиду этого обязательным элементом современной технологической схемы является раскисление стали с целью снятия избыточной окисленности. При этом свободный кислород связывается в оксиды, присутствие которых в затвердевшем металле ведет к ухудшению механических свойств готовой продукции.

В связи с этим, рафинирование стали от неметаллических включений является актуальной задачей, успешное решение которой позволит получать качественную металлопродукцию.

В настоящее время разработаны достаточно эффективные методы решения данной задачи. Однако современное ее решение предполагает кроме достижения собственно технического результата снижение расходов по переделу, то есть оптимизацию применения различных методов внепечной обработки расплава. Этого можно достичь только на основе физически обоснованных моделей, описывающих процесс рафинирования стали от включений. Предлагаемые методы описания процессов рафинирования носят, как правило, эмпирический характер, что не позволяет использовать их априори, разрабатывая рекомендации по удалению НВ из расплава, в частности при производстве кордовой стали.

## **Цель работы**

Теоретическое описание механизма рафинирования стали от неметаллических включений шлаком, предполагающее, в том числе описание переноса неметаллических включений из объема металлического расплава к границе раздела «металл-шлак» и описание процесса ассимиляции включений шлаком.

Разработка методов активного управления содержанием включений в стали путем регулирования гидродинамической обстановки в ковше и управления составом покровного ковшевого шлака.

Разработка технологии производства кордовой стали без использования вакууматора, обеспечивающей получение показателей, сопоставимых с качеством металла, произведенного по стандартной технологии.

### **Основные задачи исследования**

Анализ существующих представлений о механизме рафинирования стали от продуктов раскисления.

Выбор подхода к описанию изучаемых процессов.

Разработка математических моделей, описывающих эффективность рафинирования расплава от включений в зависимости от гидродинамики расплава и свойств покровного ковшевого шлака.

Разработка технологии рафинирования стали от неметаллических включений методами внепечной металлургии, в том числе без использования вакууматора.

### **Научная новизна**

1. Показано, что удаление неметаллических включений представляет собой сложный вероятностный процесс, определяемый массопереносом неметаллических включений к поверхности раздела фаз шлак-металл и процессом абсорбции неметаллических включений шлаком.
2. Установлено, что эффективность массопереноса неметаллических включений определяется одновременным присутствием в расплаве микропульсаций (за счет пузырей газа) и макроперемешиванием (за счет циркуляции расплава).
3. Показано, что экстремальный характер зависимости эффективности рафинирования от гидродинамики расплава обусловлен процессом эмульгирования покровного шлака. Показана возможность управления

гидродинамикой системы за счет выбора дутьевого устройства и регулирования режима продувки.

4. Показано, что эффективность процесса ассимиляции неметаллических включений шлаком определяется разностью химических потенциалов взаимодействующих фаз и носит экстремальный характер, что позволяет оптимизировать условия обработки.

### **Практическая значимость**

1. Предложена технология внепечной обработки стали, предусматривающая рафинирование расплава от неметаллических включений путем регулирования режима продувки и подбора состава покровного шлака, позволяющая получить качественный металл без проведения углеродного раскисления.
2. Разработанная технология позволила освоить производство кордовой стали в условиях ЭСПЦ-1 РУП «БМЗ» без использования вакууматора, что обеспечило рост объемов производства и снижение расходов по переделу
3. Разработана модель рафинирования кордовой стали от неметаллических включений, на основе которой можно оптимизировать технологию внепечной обработки других марок стали.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты исследований доложены и обсуждены на конференции «Современные проблемы теории и практики производства качественно стали» (г. Мариуполь, Украина, 2004 г.), на VIII конгрессе сталеплавателей (г. Нижний Тагил, 2004 г.), на конференции «Металлургия XXI века» (г. Жлобин, Белоруссия, 2004 г.), на 8-й Европейской электросталеплавильной конференции (г. Бирмингем, Великобритания, 2005 г.), в Институте металлургии Рейн-Вестфальской технической школы (г. Аахен, Германия, 2005), на 2-й конференции молодых специалистов «Металлургия XXI века» (ВНИИМЕТМАШ, 2006 г.), в Институте производства чугуна и

стали Фрайбергской горной академии (г. Фрайберг, Германия, 2006 г.), на 9-м конгрессе сталеплавателей (г. Старый Оскол, 2006 г.)

### **Публикации**

По результатам исследований опубликовано 10 печатных работ в периодических изданиях и трудах научных конференций.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав и выводов, списка использованных источников из 136 наименований и 3 приложений. Работа содержит 125 страниц текста, 49 рисунков, 15 таблиц.

## **2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** говорится о значении внепечной обработки стали в современной металлургии. Показано значение чистоты стали по неметаллическим включениям для служебных свойств металлопродукции. Поставлены цели и определены задачи работы.

**В первой главе** описаны известные методы повышения чистоты стали по неметаллическим включениям. Представлены различные точки зрения на вопрос о механизме удаления продуктов раскисления.

Анализ литературных данных показал, что снижение загрязненности стали неметаллическими включениями может быть достигнуто несколькими путями: 1) путем предотвращения образования включений, 2) за счет удаления сформировавшихся включений и 3) разложения существующих.

Уменьшить образование неметаллических включений при окончательном осаждающем раскислении можно, проведя предварительно углеродное раскисление расплава с образованием газообразных продуктов реакции. Такой подход реализуется в основном при вакуумировании, но также может быть реализован и при атмосферном давлении в случае избытка углерода.

Разложение неметаллических включений для сложившейся практики раскисления в черной металлургии практического значения не имеет.

Удаление неметаллических включений как правило производится в результате их удаления в шлак, осаждения на футеровке ковша или на специальных пористых фильтрах, устанавливаемых в промежуточных ковшах МНЛЗ.

Однако основным методом борьбы с включениями является удаление включений в покровный шлак.

Процесс рафинирования расплава от неметаллических включений можно разделить на следующие стадии: 1) массоперенос к границе раздела фаз «металл-шлак», 2) ассимиляция шлаком.

При описании первой стадии в основном используют представления о всплывании включений в невозмущенном расплаве в гравитационном поле, в концентрационных полях или под действием конвективных потоков. Лишь в некоторых работах учитывается факт, что в ковшах с пневматическим перемешиванием именно вынужденное движение расплава является преобладающим.

При описании процесса взаимодействия включений со шлаком, как правило, опираются на представления классической равновесной термодинамики, не учитывая неравновесность рассматриваемого процесса и необратимость его протекания.

Таким образом, цель работы состоит в разработке технологии рафинирования стали покровным шлаком на основе теоретического исследования и описания гидродинамики процесса переноса НВ к поверхности раздела «шлак-металл» и процесса ассимиляции включений шлаком.

**Во второй главе** рассмотрены различные варианты технологий производства качественных сталей. Дано краткое описание и анализ технологии производства кордовой стали на РУП «БМЗ». Формулируется технологическая задача работы. Описана методика сбора и обработки экспериментальных данных.

На РУП «БМЗ» основная масса металла для кордовой и бортовой проволоки производится в ЭСПЦ-2 (рис. 1). В соответствии с принятой технологией полупродукт выпускают из ДСП-3 вместимостью 100 т со средней температурой 1660°C и средним содержанием углерода 0,2% (масс.). Стандартная технология выпуска предусматривает присадку во время выпуска ферросилиция или карбида кремния, ферромарганца, науглероживателя, а также извести и плавикового шпата.

После гомогенизации расплава на установку доводки металла (УДМ) ковш поступает на печь-ковш (ПК), где регулируют состав и температуру металла и наводят покровный рафинировочный шлак.

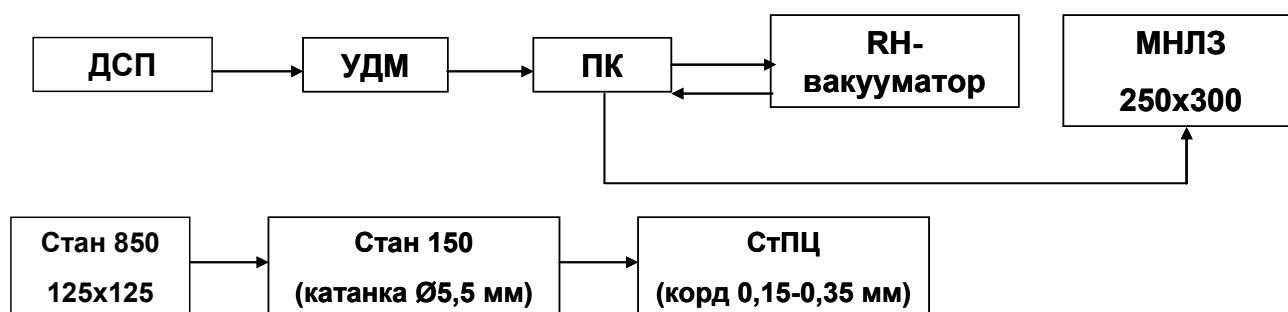


Рис.1. Базовая технология производства корда в ЭСПЦ-2 РУП «БМЗ»

Прецизионное легирование стали до марочного состава производится на одном из вакууматоров, преимущественно РН, где одновременно с этим осуществляется частичное углеродное раскисление.

После вакуумирования сталь поступает на ПК для нагрева перед разливкой. Обработка стали на ПК завершается присадкой просушенного кварцевого песка в количестве от 70 до 120 кг за 20-25 минут до передачи плавки на МНЛЗ.

После разливки блюмы сечением 250x300 мм поступают на обжимной стан 850, откуда слитки сечением 125x125 мм направляются на стан 150, производящий катанку (Ø 5,5 мм), и в дальнейшем в сталепроволочный цех (СтПЦ) для производства кордовой проволоки (Ø 0,15-0,35 мм).

Данная технология позволяет стабильно производить кордовый металл со свойствами, соответствующими требованиям ТУ14-14752-89.

В целях увеличения объемов производства на РУП «БМЗ» начато освоение



технологии производства стали для кордовой и бортовой проволоки в ЭСПЦ-1 (рис. 2), что в условиях конкретного производства позволяет ликвидировать один прокатный передел.

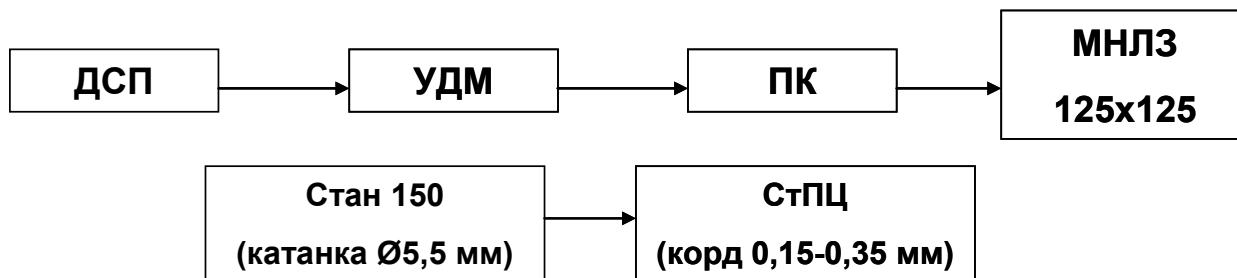


Рис. 2. Опытная технология производства корда в ЭСПЦ-1 РУП «БМЗ»

Однако отсутствие в технологической цепочке вакууматора не позволяет проводить углеродное раскисление, в результате чего основным методом рафинирования расплава от НВ является обработка расплава покровным шлаком на ПК.

В процессе выполнения работы использовали электронные базы данных стандартной технологической информации, проводили исследовательские плавки с дополнительным отбором проб металла во время проведения внепечной обработки в соответствии с разработанной методикой (табл. 1). При этом помимо литых проб металла непосредственно во время внепечной обработки отбирались пробы катанки.

Анализ состава проб металла и шлака проводили в ЦЗЛ РУП «БМЗ» по стандартной сертифицированной методике. Для контроля химического состава стали и шлака использовали Leco CS (C и S), Leco TN (N), спектральный анализатор ARL (Si, Mn, P, Cr, Cu, Al и др.). Химический анализ сталеплавильных шлаков проводили на рентгено-флюоресцентном анализаторе ARL.

Таблица 1. Методика сбора информации

Контролируемый параметр	Этап производства				
	УДМ	ПК (начало обработки)	ПК (середина обработки)	ПК (окончание обработки)	Катанка
Присадки	+	+	+	+	
Температура	+	+	+	+	
Состав металла	+	+	+	+	+
Состав шлака	+	+	+	+	
Неметаллические включения					+

Оценку загрязненности катанки производили по методике фирмы «Pirelli», в соответствии с которой подсчитывается общее количество включений размером более 1 мкм по всей площади поперечного сечения образца металла, определяется их химический состав и размер, рассчитывается плотность включений. Химический состав включений наносится на треугольник составов (CaO, MgO, MnO)–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, разбитый на 3 области: область «А» – обогащенная SiO<sub>2</sub>; область «В» – обогащенная CaO, MgO и MnO; область «С» – обогащенная Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (более 50%).

Плотность включений с размерами > 1 мкм должна не должна превышать 1000 шт/см<sup>2</sup>, а плотность включений с содержанием окиси алюминия более 50% в поле С не должна превышать 20 шт/см<sup>2</sup>.

Определение химического состава, размера и количества включений и производили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) «Cambridge» с микроанализатором «Stereoscan 120».

Литые пробы анализировали в металлографической лаборатории ЦЗЛ РУП «БМЗ» в соответствии с ГОСТ 1778 по методу «Л», предназначенному для анализа исследовательских проб. Использовали металлографический микроскоп фирмы «UNION» (разрешающая способность  $\mu = 0,52$ ; цена деления окулярной шкалы – 0,01 мм, погрешность деления –  $\pm 0,002$  мм). Исследования вели при увеличении 400X. В соответствии с рекомендациями государственного стандарта проба после шлифования и полирования расчерчивалась параллельными линиями общей длиной 6 см, вдоль которых

определялись количество и размеры неметаллических включений. Включения классифицировались по группам в зависимости от морфологии.

Массив собранных данных включал результаты 60 плавов с различной степенью контроля производственного процесса.

**В третьей главе** проанализирован теоретический подход к описанию процесса массопереноса неметаллических включений к границе раздела фаз «металл-шлак».

В условиях интенсивной продувки металлического расплава инертным газом теряет свое значение всплытие неметаллических включений в результате действия сил выталкивания, вследствие разности плотностей металла и оксидной фазы, а также перенос включений конвективными потоками или их движение в концентрационных полях.

Поведение расплава в ковшах, обрабатываемых инертным газом, имеет сложный характер (рис. 3). Пузыри газа, поступая в расплав, формируют двухфазную область – газожидкостный факел. Металл в этой области движется с линейной скоростью  $\vec{V}$ , вовлекая в циркуляционное движение весь объем металла.

Пузыри инертного газа в процессе всплытия, как показали Левич, Oeters и другие исследователи, меняют свои размеры и форму как в результате нагрева и изменения ферростатического давления, так и в результате неравномерного приложения давления по их высоте. Это ведет к симбатному изменению скорости расплава в поперечном направлении со скоростью  $\vec{v}$  относительно оси газожидкостного факела. В результате воздействия на расплав в этой области ансамбля всплывающих пузырей происходит турбулизация расплава. При этом масштаб вихрей, генерируемых в расплаве, определяется амплитудой изменения радиуса пузыря газа.

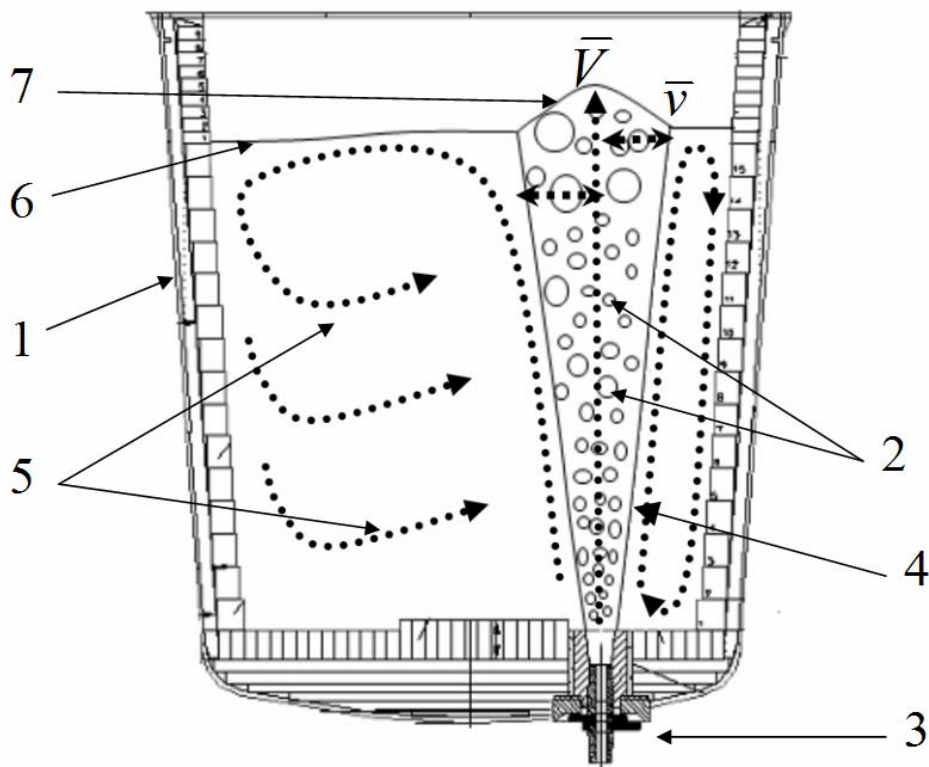


Рис.3. Движение расплава в ковше в процессе продувки:

1 – ковш, 2 – пузыри, 3 – продувочное устройство, 4 – газожидкостный факел, 5 – контур циркуляции, 6 – шлак, 7 – бурун,  $\bar{V}$  – скорость движения металла в газожидкостном факеле, м/с,  $\bar{v}$  – скорость, генерируемая пузырями, м/с

Для оценки степени турбулизации расплава был использован подход<sup>1</sup>, согласно которому ее степень оценивали по величине дисперсии скорости металла как в газо-жидкостном факеле, так и в масштабах всего ковша.

Дисперсия скорости вследствие пульсации всплывающих пузырей газа определяется выражением:

$$D_{II}^{\Sigma} = \Sigma(v_i - \bar{v})^2 \cdot p_i, \quad (1)$$

где  $v_i$  – скорость расплава, генерируемая пузырем газа в данной точке, м/с;  $\bar{v}$  – средняя по ансамблю скорость расплава в поперечном направлении, м/с.

Принимая, что для ансамбля одновременно всплывающих пузырей  $\bar{v}$  равна нулю, получаем:

<sup>1</sup> А.В. Тихонов «Прогнозирование и управление однородностью стального расплава с целью повышения стабильности химического состава литой заготовки» дисс. к.т.н., Москва, 2003

$$D_{\Pi} = \frac{Q}{V_0} \cdot \int_0^H v^2(H) dV(H), \quad (2)$$

где  $Q$  – общий расход газа, м,  $V_0$  – объем пузыря приведенный к нормальным условиям, м<sup>3</sup>,  $v(H)$  – скорость расплава, генерируемая пузырем на глубине  $H$ , м/с,  $V(H)$  – объем пузыря на глубине  $H$ , м<sup>3</sup>.

Дисперсия скорости, возникающая вследствие макроциркуляции расплава, может быть рассчитана по уравнению:

$$D_V = \frac{V_{\phi}}{V_{Me}} \cdot V^2, \quad (3)$$

где  $V_{\phi}$  – объем газожидкостного факела, м<sup>3</sup>,  $V_{Me}$  – объем расплава, м<sup>3</sup>,  $V$  – линейная скорость движения расплава в факеле, м/с.

Линейную скорость движения металла в газожидкостном факеле определяли, используя выражение:

$$V = H_{\phi}^{K_1} \cdot (1 - \exp(-K_2 \cdot J)) \cdot J^{K_3}, \quad (4)$$

где  $J$  – интенсивность продувки, м<sup>3</sup>/час,  $H_{\phi}$  – глубина погружения продувочного устройства или глубина расплава в случае донной продувки, м.

Значения коэффициентов регрессии  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  получены для основных типов продувочных устройств (табл. 2), что позволяет адаптировать результаты расчетов к разным условиям.

Таблица 2. Значения коэффициентов для различных типов продувочных устройств

Тип продувочного устройства	Значения коэффициентов в уравнении		
	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Фурма с пористым соплом	0,5	1	-0,23
Фурма с круглым соплом	0,5	0,025	0,01
Объединенный массив	0,5	0,07	-0,01

В общем случае количество включений в стали после обработки зависит от длительности продувки, суммарной степени турбулизации расплава и исходного содержания включений:

$$N_{HB} = f(D_{II}, D_V, N_0, \tau), \quad (5)$$

где  $N_0$  – начальное количество неметаллических включений,  $\tau$  – продолжительность продувки.

Доставка неметаллических включений к границе раздела металл-шлак представляет собой сложный вероятностный процесс, зависящий как от массопереноса включений к поверхности раздела макропоток, так и от перехода включений из объема потока к собственно границе раздела фаз в результате микропульсаций, и может быть описана выражением:

$$N_{HB} = N_0 e^{-k(D_V + D_{II})\tau}. \quad (6)$$

Параметры полученного выражения были определены по результатам промышленных испытаний на сталях разных марок в условиях ЭСПЦ-1 и ЭСПЦ-2 РУП «БМЗ».

На рис. 4 показана зависимость между степенью турбулизации расплава и количеством неметаллических включений.

На графике выделены точки, соответствующие плавкам, на которых рафинировочный шлак был либо переокислен ( $(\%FeO) + (\%MnO) > 1\%$ ), либо имел содержание  $(\%SiO_2)$  значительно меньше среднего по выборке.

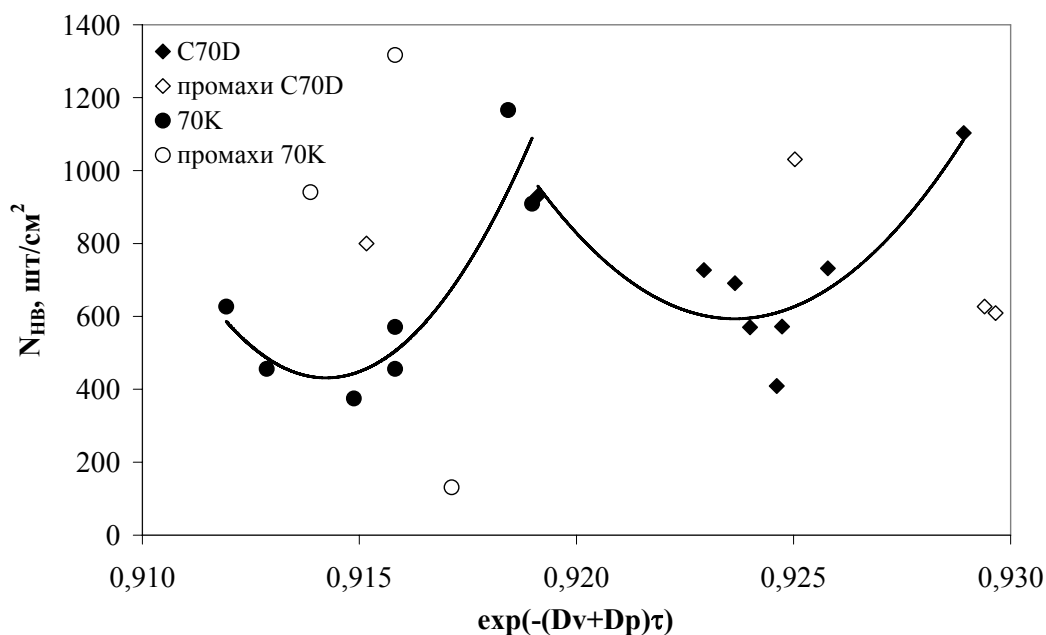


Рис. 4. Зависимость количества неметаллических включений от степени турбулизации расплава

Разделение массива данных на две части связано, по-видимому, с особенностями технологии производства этих сталей в разных цехах.

Используя данные, приведенные на рис. 5, можно определять не только оптимальную интенсивность, но и продолжительность продувки.

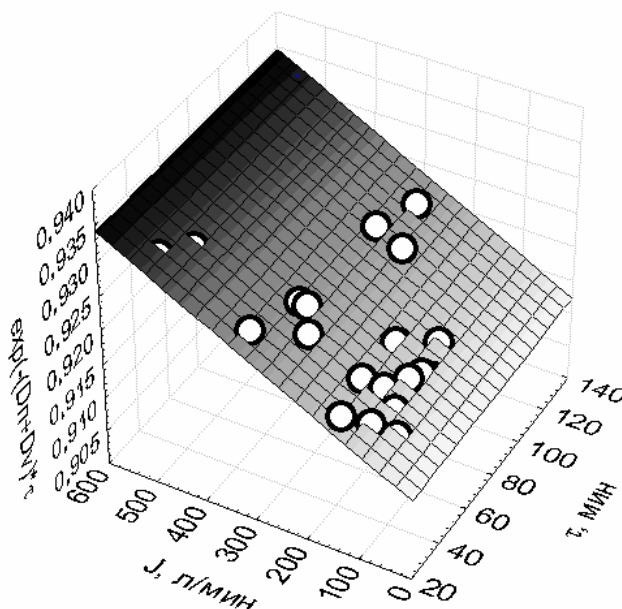


Рис. 5. Зависимость степени турбулизации расплава от интенсивности и длительности продувки расплава инертным газом

Холодное моделирование процесса донной продувки показало, что в зоне взаимодействия газожидкостного факела со шлаком происходит эмульгирование шлака (рис. 6).

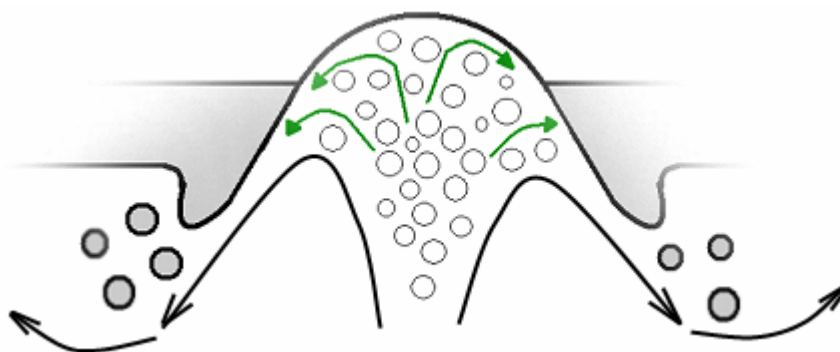


Рис. 6. Схема эмульгирования шлака

Для описания процесса эмульгирования использовали критерий Вебера, который описывает соотношение между силой поверхностного натяжения и силой инерции газожидкостного факела:

$$We = \frac{W_z^2 d_c \rho_{Me}}{\sigma}, \quad (7)$$

где  $W_z$  – скорость газа в сопле (щели), м/с;  $d_c$  – диаметр сопла или толщина щели, м;  $\rho_{Me}$  – плотность жидкого металла, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – поверхностное натяжение металла, Н/м.

Совокупная площадь капель шлака, проникающих в объем расплава в зависимости от величины  $We$  представлена на рис. 7.

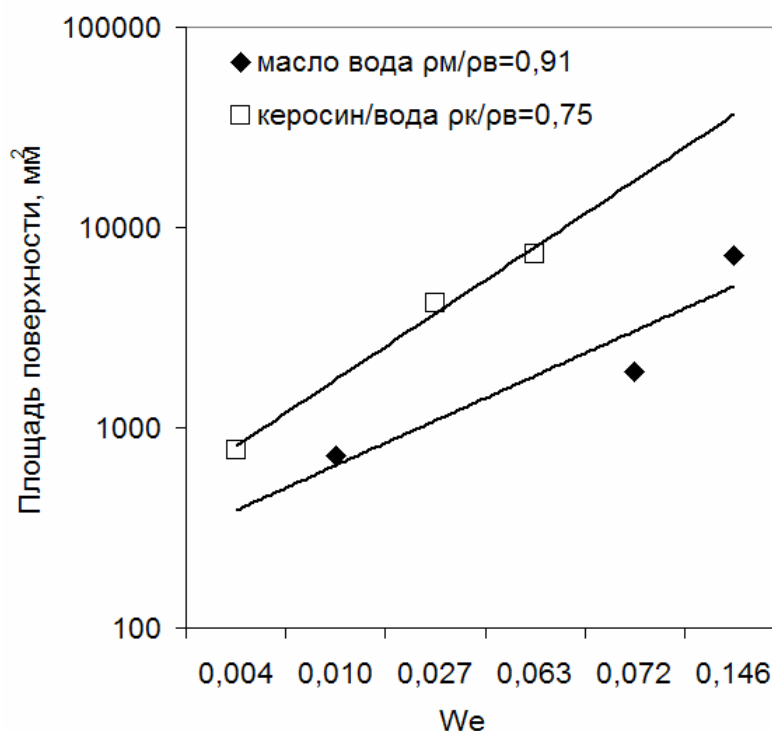


Рис. 7. Зависимость площади поверхности капель от значения  $We$

Видно, что по мере возрастания  $We$  и при приближении свойств системы к реальным металлургическим, степень эмульгирования резко возрастает. Это может привести не к рафинированию расплава, а к его загрязнению включениями.

**Четвертая глава** посвящена описанию взаимодействия неметаллических включений со шлаком.

В результате взаимодействия неметаллических включений со шлаком должно устанавливаться наиболее выгодное термодинамическое состояние системы, то есть состояние с наименьшим уровнем свободной энергии.



Для описания металлургических систем можно использовать феноменологические соотношения между потоками и силами, называемые также постулатами Л. Онзагера, позволяющие в единой форме описывать процессы различной природы: химические реакции, массоперенос, теплоперенос, электрические явления.

Согласно первому постулату Онзагера существует линейная связь между движущими силами процессов и потоками свойств системы:

$$J_i = \sum_{j=1}^m L_{ij} X_j, \quad (8)$$

где  $J_i$  – термодинамический поток,  $L_{ij}$  – феноменологический коэффициент,  $X_j$  – термодинамическая движущая сила.

Сравнив значения химических потенциалов всех компонентов для обеих контактирующих фаз, можно ответить на вопрос, в какой фазе существование компонента  $i$  термодинамически более выгодно. При этом разность химических потенциалов, представленная в виде градиента химического потенциала, представляет собой движущую силу процесса массопереноса:

$$J_i = L_i \cdot \text{grad} \mu_i. \quad (9)$$

Обозначив в общем случае химический потенциал компонента шлака  $\mu_{(R_xO_y)}^{ШЛ}$ , а химический потенциал компонента неметаллического включения  $\mu_{(R_xO_y)}^{HB}$ , получаем:

$$J_{(R_xO_y)} = \frac{L}{\delta_{ШЛ}} (\mu_{(R_xO_y)}^{HB} - \mu_{(R_xO_y)}^{ШЛ}), \quad (10)$$

где  $\delta_{ШЛ}$  – толщина пограничного слоя шлака на границе с металлом.

Вследствие отсутствия надежных методик определения толщины пограничного слоя уравнение (10) записали для многокомпонентной системы через разность обобщенных химических потенциалов:

$$\Delta \mu = \mu_{\Sigma}^{ШЛ} - \mu_{\Sigma}^{HB} = k \left( \left( \sum x_i \ln a_i^{ШЛ} \right) - \left( \sum x_i \ln a_i^{HB} \right) \right), \quad (11)$$

где  $a_i$  – активность компонента в шлаке и неметаллических включениях, соответственно,  $k = \frac{L}{\delta_{шл}}$  – эмпирический коэффициент.

Исследования неметаллических включений в пробах литого металла, отобранных до и после обработки стали на ПК, показали, что более 90% неметаллических включений относятся к размерной группе 0-5 мкм. В связи с этим, а также, учитывая стабильность технологии внепечной обработки на РУП «БМЗ», приняли, что эффективность процесса рафинирования расплава от неметаллических включений не будет зависеть от размеров включений, но полностью будут определяться гидродинамикой системы и термодинамическими условиями их сорбции.

Расчет активности компонентов фаз проводили по теории А.Г. Пономаренко, в соответствии с которой шлак рассматривается в виде атомарной системы с коллективизированными электронами.

Допущение о возможности проведения расчетов активностей компонентов неметаллических включений по теории, разработанной для шлаков, было сделано на основании изучения агрегатного состояния неметаллических включений в расплаве.

С этой целью при подсчете количества неметаллических включений в литых пробах фиксировали информацию об их форме, а также определяли химический состав для каждой группы включений.

Оказалось, что все НВ, за исключением включений корунда, являются глобулярными, что свидетельствует об их пребывании в расплаве в жидком виде.

Кроме того, состав включений, как правило, является сложным (табл. 3). По классификации Р. Кислинга обнаруженные типы НВ близки по составу к следующим минералам: оксиды типа В – кристобалит ( $\text{SiO}_2$ ); силикаты А – родонит ( $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ); силикаты В – кристобалит в оболочке родонита; силикаты (алюминаты) В (сложные) – анортит/гроссулярит; силикаты С – неизвестный силикат кальция. Все эти соединения за исключением обогащенных  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , являются легкоплавкими при температурах сталеплавильных процессов.

**Таблица 3. Состав типичных неметаллических включений на  
исследовательских плавках по данным РЭМ**

№/марка	№ НВ	Тип НВ	Элементный состав, %(масс.)						Фазовый состав, %(масс.)***			
			Al	Si	Mn	Mg	Ca	O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	CaO
32827/ 70K	1	ОА	21,1	-	-	-	43,3	** Ост.	40	-	-	60
	2	ОВ*	0,0	45,0	1,0	0,0	0,6	Ост.	-	96,5	-	-
	3	ОВ	0,0	45,5	1,2	0,0	0,6	Ост.	-	97,5	-	-
	4	СА	0,5	24,1	34,1	0,0	2,2	Ост.	-	51,6	44,1	-
32828/ 70K	1	СА	0,6	24,0	25,7	0,4	8,8	Ост.	-	51,4	33,2	-
32826/ 70K	1	СА	0,1	22,8	38,6	0,0	0,1	Ост.	-	48,9	49,9	-
	2	СА	0,0	26,6	31,5	0,0	0,9	Ост.	-	56,9	40,6	-
	3	СА	0,0	24,5	36,5	0,0	0,3	Ост.	-	52,5	47,1	-
23887/ C70D	1	СВ	1,3	33,5	18,6	0,0	1,2	Ост.	-	71,8	24,0	-
	2	СС	4,4	11,0	0,0	0,9	44,6	Ост.	-	23,6	-	62,5
	3	СВС	6,5	22,5	5,8	0,0	22,5	Ост.	-	48,1	7,5	31,5
23886/ C70D	1	СВС	19,3	6,2	0,8	1,2	32,5	Ост.	39,94	-	-	45,6
	2	СВС	10,6	9,6	1,2	2,7	37,3	Ост.	22,01	20,7	1,5	52,2
	3	СВС	28,1	7,9	1,1	1,6	17,2	Ост.	58,32	17,0	1,4	24,1
	4	СВС	37,5	8,1	0,9	0,0	7,5	Ост.	77,81	-	-	10,5

Примечания: \* ОВ – оксид типа В, СА – силикат типа А, СВ – силикат типа В, СС – силикат типа С, СВС – силикат типа В сложного состава; \*\*Ост. – остаток; \*\*\* Сумма оксидов не равна 100% из-за погрешностей измерений

Установлено, что более 90% от общего количества неметаллических включений в литых пробах относятся к типам: оксид А и силикаты А и В. Средний состав данных включений приведен в табл. 4.

**Таблица 4. Фазовый состав основных типов включений**

Тип НВ	Фазовый состав, % (масс.)			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	CaO
ОА	40	-	-	60
СА	-	55	45	-
СВ	-	70	30	

Доля каждого типа включений составляет: ОА – 20%, СА – 50%, СВ – 30%. То есть общая доля силикатов марганца в литых пробах составляет 80%.

Анализ изображений включений показал, что все указанные типы являются глобулярными, то есть будут вызывать меньшие напряжения в металлической матрице, чем остроугольные корундовые. Однако важнейшим показателем качества кордовой стали является общая загрязненность неметаллическими включениями. В связи с этим уточняя технологическую задачу рафинирования стали от неметаллических включений, шлаковый режим разрабатывали с целью удаления наиболее многочисленных типов неметаллических включений – силикатов марганца.

В результате проведения расчетов была получена зависимость между величиной разности обобщенных химических потенциалов и количеством неметаллических включений в стали (рис. 8).

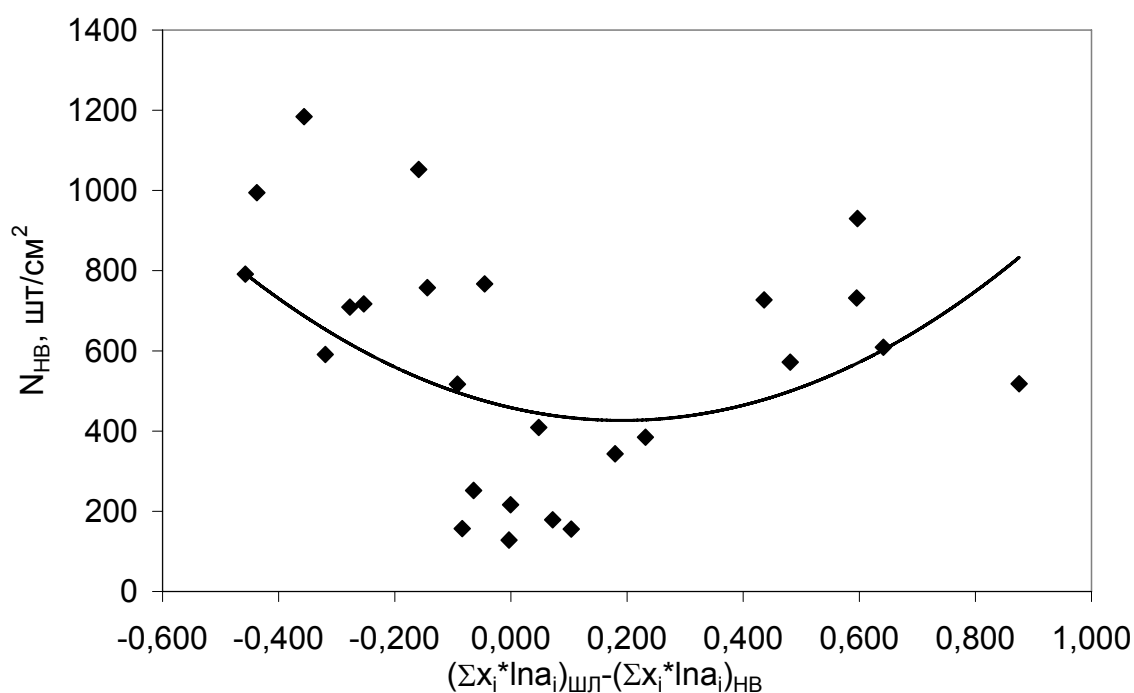


Рис.8. Зависимость загрязненности стали неметаллическими включениями от разности обобщенных химических потенциалов по оксидам:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$ .

Отсюда следует, что для включений типичных для кордовой стали, существуют шлаки, оптимальные с точки зрения ассимиляции продуктов раскисления.

Сопоставили состав включений в кордовом металле и состав шлака в критических областях, акцентируя внимание на содержании оксидов кремния, марганца и железа. Было установлено (табл. 5), что области с высокой загрязненностью характеризуются повышенной окисленностью шлака и пониженным содержанием оксида кремния. Шлаки для области с низкой

загрязненностью характеризуются содержанием  $\text{SiO}_2$  на среднем уровне и хорошей раскисленностью.

Таблица 5. Состав шлака (средний по выборке и в критических областях)

	<b>CaO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>FeO+MnO</b>	<b>MgO</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>
Средний состав шлака	54,4	29,7	2,1	8,9	0,1	4,4
Область с высокой загрязненностью	50,2	26,7	3,2	13,0	0,1	6,4
Область с низкой загрязненностью	54,6	31,7	1,1	8,3	0,1	3,8

**Пятая глава** посвящена практической реализации разработанных рекомендаций.

Эксперименты проводили на углеродистых марках стали, близких по составу к кордовой – марки C70D и C76D. Всего было проведено 8 тестовых и 10 сравнительных плавов (табл. 6).

Таблица 6. Параметры тестовых и сравнительных плавов

Марка	Образование шлака	Шлак			Обработка Ar	
	Песок, кг	(SiO <sub>2</sub> ), %	(FeO+ MnO), %	В	J, л/мин	τ, с
C70D	200	30	0,39	1,9	60	38
C70D	200	30	1,14	1,9	177	63
C70D	200	25	1,58	2,0	275	30
C70D	200	25	0,94	2,1	342	60
C76D	50	24	0,48	н.д.	н.д.	н.д.
C76D	70	24	0,74	н.д.	289	100
C76D	80	23	1,87	2,7	174	83
C70D	280	31	0,70	1,8	602	26
C70D	200	24	1,47	2,5	518	71
C70D	80	23	1,75	2,8	373	37
C70D	50	18	1,27	н.д.	327	27
C70D	50	22	0,38	н.д.	237	100
C70D	100	24	0,37	н.д.	491	46
C76D	100	н.д.	н.д.	н.д.	113	69
C76D	120	16	3,92	н.д.	546	136
C76D	120	21	2,21	н.д.	285	51
C76D	70	н.д.	н.д.	н.д.	256	41
C76D	70	21	0,64	н.д.	162	44

Сравнительные плавки проводили в соответствии с действующей технологической инструкцией.

При проведении опытных плавков поддерживали среднюю интенсивность продувки как на установке доводки металла, так и на установке печь-ковш на уровне 100-300 л/мин.

Раскисление стали производили путем присадки на выпуске в общей сложности от 200 до 450 кг SiC или FeSi.

После подачи металла на установку печь-ковш производили отбор пробы металла, шлака, производили замер температуры и начинали нагрев металла. По окончании нагрева проводили легирование стали под высокоосновным шлаком ( $B=2,5-3,0$ ).

После отбора второй пробы металла и получения результатов анализа, подтверждавших достижение требуемой чистоты по сере, осуществляли присадку кварцевого песка в количестве 200-300 кг для повышения в шлаке содержания оксида кремния и снижения основности до 1,5-2,0. Расход песка выбирали в зависимости от расхода извести на выпуске и во время обработки на установке печь-ковш.

Шлак раскисляли шлакораскисляющей смесью (ШРС) с общим расходом 10-200 кг порциями по 20-50 кг. ШРС получали путем смешивания ферросилиция с массовым содержанием кремния 75% (масс.), плавикового шпата и науглероживателя типа «А», фракцией до 10 мм, в массовом соотношении 2:1:1. На ряде плавков использовали ШРС на основе карбида кремния с целью избежать возможного загрязнения стали  $Al_2O_3$  из FeSi, произведенного алюмотермическим путем. В результате совместного использования ШРС и кварцевого песка достигали содержания  $SiO_2$  в шлаке на уровне около 25-30 % (масс.). Окисленность шлака на опытных плавках не превышала 1 % (масс.).

Интенсивность продувки при проведении тестовых плавков находилась в заданных пределах.

Результаты промышленных испытаний показали (рис. 9), что точное выполнение рекомендаций позволило обеспечить плотность неметаллических включений в металле ниже, чем на сравнительных плавках и отвечающее требованиям ТУ14-14752-89.

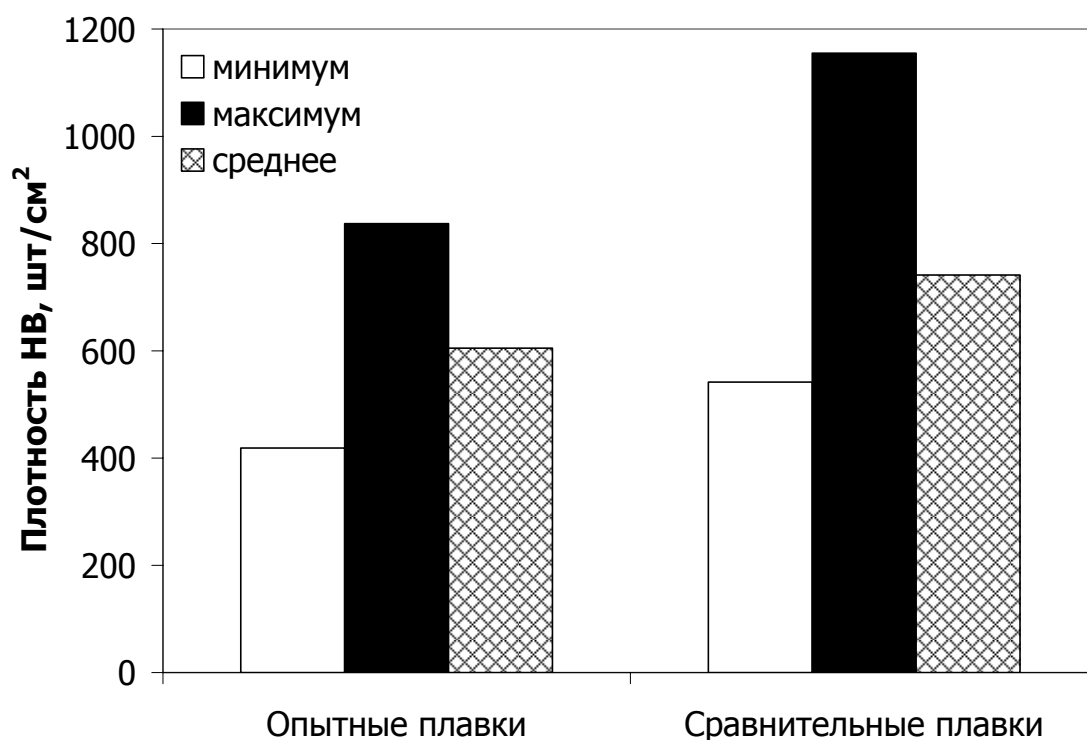


Рис.9. Загрязненность включениями металла сравнительных и опытных плавков

Анализ включений в катанке показал, что после обработки наибольшая доля включений находится в области «В» (рис. 10). В наиболее опасной зоне «С» в среднем оказалось 2 % включений, в то время как на сравнительных плавках – 9 %.

Внедрение данной технологии в условиях РУП «БМЗ» позволило освоить выпуск металлокорда в ЭСПЦ-1 без использования вакуумирования.

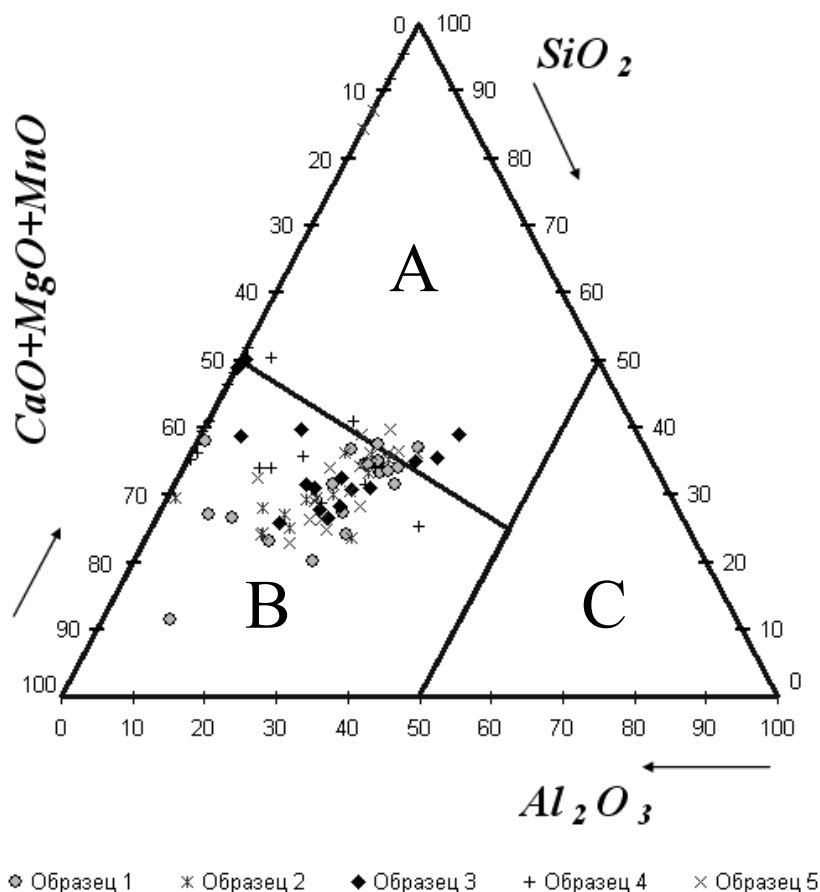


Рис.10. Пример загрязненности катанки из металла опытной плавки неметаллическими включениями

### **Основные выводы**

1. Изучен процесс рафинирования стали от неметаллических включений во время внепечной обработки в системах с пневматическим перемешиванием.
2. Удаление неметаллических включений описано, как сложный вероятностный процесс, определяемый массопереносом неметаллических включений к поверхности раздела фаз шлак-металл и процессом абсорбции неметаллических включений шлаком.
3. Показано, что эффективность массопереноса неметаллических включений зависит от турбулизации расплава, определяемой присутствием в расплаве микропульсаций (за счет пузырей газа) и макроперемешиванием (за счет движения расплава).
4. На основе холодного моделирования показано, что экстремальный характер зависимостей эффективности рафинирования от гидродинамики



- расплава обусловлен процессом эмульгирования покровного шлака. Показана возможность управления гидродинамикой системы за счет выбора дутьевого устройства и регулирования режима продувки.
5. Установлено, что эффективность процесса ассимиляции неметаллических включений шлаком определяется разностью обобщенных химических потенциалов взаимодействующих фаз. Полученная зависимость имеет экстремальный характер, что позволяет оптимизировать условия шлакового рафинирования.
  6. Разработаны модели рафинирования кордовой стали от неметаллических включений, на основе которых возможна оптимизация технологии внепечной обработки других марок стали при минимальном количестве дополнительной информации.
  7. Разработанная технология внепечной обработки стали прошла успешную промышленную апробацию при производстве углеродистых сталей в ЭСПЦ-1 РУП «БМЗ». В результате произвели кордовый металл в отсутствие вакуумирования без снижения качественных показателей по сравнению с принятой технологией.
  8. Внедрение разработанной технологии является предпосылкой для производства кордовой стали в ЭСПЦ-1 РУП «БМЗ», что обеспечит увеличение объема производства и уменьшение расходов по переделу.

**Основные положения диссертации изложены в работах:**

1. С.В. Казаков, В.Ю. Гуненков, И.В. Кушнерев, П.В. Бизюков, В.А.Маточкин, Н.В.Андрианов «О возможности производства металла кордового качества без использования вакууматора на первой очереди РУП БМЗ» // Труды конференции «Металлургия XXI века», Белоруссия, Жлобин, 10-11 июня 2004 г., с. 25-28
2. С.В. Казаков, В.Ю. Гуненков И.В. Кушнерев, П.В. Бизюков, В.А.Маточкин, Н.В.Андрианов «Прогнозирование и управление количеством неметаллических включений в кордовом металле» // «Электрометаллургия», № 9, 2004 г., с. 12-16
3. И.В. Кушнерев, С.В. Казаков, В.А. Маточкин, В.В. Пивцаев, Н.В. Андрианов «Влияние внепечной обработки на количество

- неметаллических включений в стали» // Труды конференции «Современные проблемы теории и практики производства качественно стали», Мариуполь, 8-10 сентября, 2004 г., с. 161-163
4. С.В. Казаков, В.Ю. Гуненков, И.В. Кушнерев, П.В. Бизюков, В.А. Маточкин, Н.В. Андрианов «Принципы регулирования количества неметаллических включений в стали на примере кордового металла» // Труды 8-го конгресса сталеплавильщиков, Нижний Тагил, 17-21 октября 2004 г. с. 306-311
  5. Казаков С.В., Окорочков Б.Н., Самсонов М.В., Кушнерев И.В., Шендриков П.Ю.: Актуальные вопросы моделирования технологических процессов и производств. Научно-технологическое обеспечение инновационной деятельности предприятий институтов и фирм в металлургии. М.: МИСиС, 2004
  6. С.В. Сухарев, И.В. Кушнерев, С.А. Королев, С.В. Казаков, Ю.С. Демин. «Совершенствование технологии внепечной обработки стали с использованием внепечной обработки» // Металлург, №3, 2005, с.43-46
  7. С.В. Казаков, В.Ю. Гуненков, В. Гартен, И.В. Кушнерев, В.В. Эндерс. «Regulation of nonmetallic inclusions quantity in cord metal (Регулирование количества неметаллических включений в кордовом металле)» // Труды 8-й Европейской электросталеплавильной конференции, Великобритания, Бирмингем, 9-11 мая 2005
  8. С.В. Казаков, В.Ю. Гуненков, И.В. Кушнерев, П.В. Бизюков, М.П. Гуляев. «Влияние внепечной обработки на количество неметаллических включений в стали» // Труды 2-й конференции молодых специалистов «Металлургия XXI века», ВНИИМЕТМАШ, 2006. с.43-49
  9. С.В. Казаков, П.В. Бизюков, В.Ю. Гуненков, И.В. Кушнерев, М.П. Гуляев. Влияние внепечной обработки на количество неметаллических включений в стали. Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия", № 10, 2006. с. 37-40
  10. Кушнерев И.В., Казаков С.В. «Физико-химическое описание процесса удаления неметаллических включений во время внепечной обработки стали» // Труды 9-го конгресса сталеплавильщиков, Старый Оскол, 2006