



Морозов Иван Сергеевич

**Развитие технических и технологических основ  
производства конвертерных сталей для мелющих шаров  
с повышенными эксплуатационными свойствами**

Специальность: 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Уманский Александр Александрович

Новокузнецк, 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном  
образовательном учреждении высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Уманский Александр Александрович

Официальные оппоненты: Шешуков Олег Юрьевич  
доктор технических наук, профессор,  
директор Института новых материалов и технологий  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
г. Екатеринбург

Потапова Марина Васильевна  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры металлургии и химических  
технологий ФГБОУ ВО «Магнитогорский  
государственный технический университет им. Г.И.  
Носова», г. Магнитогорск

Ведущая организация: ФГБУН «Институт металлургии Уральского  
отделения Российской академии наук»,  
г. Екатеринбург

Защита состоится «25» июня 2024 г. в 13-00 в ауд. 3П на заседании  
диссертационного совета 24.2.401.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский  
государственный индустриальный университет» по адресу 654007, Кемеровская  
область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, зд. 42,  
СибГИУ.

факс: (3843) 46-57-92; e-mail: ds21225201@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и  
на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный  
университет» [www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.401.01,  
д.т.н., доцент



Уманский Александр  
Александрович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы.**

Одной из основных тенденций развития современной металлургии является увеличение доли производства качественных сталей специального назначения. К указанному сортаменту в полной мере можно отнести стали для производства мелющих (помольных) шаров. Условия эксплуатации мелющих шаров определяют повышенные требования к их твердости, устойчивости к абразивному износу и ударным нагрузкам. При этом фактический опыт работы предприятий различных отраслей промышленности (металлургические комбинаты, горнорудные предприятия), использующих помольные шары в мельницах барабанного типа для измельчения исходного сырья, свидетельствует о наличии проблемы недостаточного эксплуатационного ресурса мелющих шаров. Преждевременный раскол помольных шаров приводит не только к повышенному их расходу, что увеличивает общие затраты на измельчение исходного сырья, но и значительно ухудшает качество самого измельчаемого материала.

Формирование высокой ударной стойкости мелющих шаров, обеспечивающей минимизацию преждевременного их раскола в процессе эксплуатации, невозможно без обеспечения металлургического качества шаров и исходных непрерывнолитых заготовок, а именно их минимальной загрязненности неметаллическими включениями, низкого содержания постоянных вредных примесей и газов, отсутствия дефектов макроструктуры. При этом в соответствии с технологией производства, принятой в современных сталеплавильных цехах, параметры качества непрерывнолитых заготовок, связанные с наличием дефектов их макро- и микроструктуры, в значительной мере закладываются на этапах выплавки и ковшевой обработки стали.

С учетом вышесказанного, а также принимая во внимание, что наибольшая доля шаровых сталей в отечественной металлургии производится в кислородно-конвертерных цехах, выбранное направление исследований по совершенствованию технологии выплавки и внепечной обработки конвертерных шаровых сталей является актуальным.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Анализ литературных данных показывает, что подавляющее большинство исследований, направленных на повышение механических свойств и эксплуатационных характеристик мелющих шаров, связано с разработкой и обоснованием оптимального химического состава шаров в сочетании с режимами их термической обработки и не имеет своей основной задачей улучшение показателей металлургического качества шаров. Тематика научных исследований, связанная с влиянием металлургического качества мелющих шаров на их ударную стойкость, практически не развивается и частично, в виде вспомогательных данных, затронута только в работах ученых Уральской научной школы (профессоров Шевченко О.И., Шварца Д.Л.), а также в работах профессора Ефременко В.Г. Также нужно констатировать, что на текущий момент практически отсутствует информация по разработке оптимальных параметров дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки,

рациональных схем внепечной обработки стали применительно к специальным сталям шаровых марок.

**Работа выполнена** в рамках: гранта РФФИ №22-29-20170 «Разработка теоретических и технологических основ переработки отбраковки заготовок легированных рельсовых сталей в высокорентабельные мелющие шары повышенной твердости, износо- и ударостойкости», 2021-2022 гг.

**Цель:** Теоретическое обоснование и разработка технических и технологических решений по совершенствованию выплавки и ковшевой обработки шаровых сталей для обеспечения повышенного металлургического качества и ударной стойкости производимых мелющих шаров.

В рамках достижения цели сформулированы **основные задачи:**

1. Провести численное моделирование аэро- и гидродинамических процессов при верхней продувке расплава в большегрузном конвертере в зависимости от периода операции, уровня и количества газошлаковой фазы.

2. Выполнить моделирование распределения температурных полей в наконечнике кислородных фурм различных конструкций и обосновать вероятность торцевого износа головок фурм в процессе продувки конвертерной ванны.

3. Для условий продувки расплава в большегрузном конвертере разработать эффективные конструкции кислородных фурм с центральным охлаждением, обеспечивающие повышение стойкости их наконечников.

4. Разработать режимы выплавки и внепечной обработки конвертерных шаровых сталей, применение которых обеспечивает повышение показателей их качества без увеличения расходов на производство.

5. Выполнить исследования основных параметров качества макро- и микроструктуры непрерывнолитых заготовок шаровых сталей, произведенных с использованием различных режимов конвертерной плавки и внепечной обработки.

6. Провести экспериментальные исследования степени влияния дефектов непрерывнолитых заготовок на ударную стойкость производимых из них мелющих шаров.

7. Исследовать характер и степень влияния технологических параметров выплавки и внепечной обработки шаровых сталей на отбраковку мелющих шаров при их испытаниях на ударную стойкость.

**Научная новизна:**

1. Применительно к процессу выплавки стали в большегрузных конвертерах получена новая информация о характере движения газошлакометаллической фазы в объеме рабочего пространства, механизме накопления газа в подфурменной зоне и выходе продуктов реакции на поверхность ванны при кислородной продувке расплава. Указанная информация является теоретической базой для совершенствования режимов конвертерной плавки с целью повышения качества шаровой стали.

2. Получены новые научно-обоснованные данные о распределении температурных полей в объеме наконечников кислородных фурм различных конструкций, являющиеся базой для разработки и совершенствования

конструкций дутьевых устройств повышенной стойкости.

3. Определены закономерности влияния технологических параметров выплавки и внепечной обработки конвертерных шаровых сталей на образование дефектов непрерывнолитых заготовок, параметры металлургического качества и ударостойкость производимых из них мелющих шаров.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Усовершенствованы параметры дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки, режимы раскисления и внепечной обработки шаровых сталей в условиях кислородно-конвертерного цеха №2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК», что обусловило повышение металлургического качества производимых на указанном предприятии мелющих шаров и снижение их отбраковки при испытаниях на ударную стойкость на 3% (подтверждено Справкой об использовании в производстве результатов диссертации).

2. Выполнено техническое проектирование новых конструкций 6-ти сопловых наконечников кислородных фурм с центральным охлаждением, обеспечивающих повышение стойкости дутьевых устройств, в том числе при выплавке шаровых сталей. Проектно-техническая документация передана для внедрения в сталеплавильное производство АО «ЕВРАЗ ЗСМК», что подтверждено соответствующей Справкой.

3. Получены аналитические зависимости влияния технологических параметров выплавки и ковшевой обработки шаровых сталей массового сортамента на отбраковку мелющих шаров по причине неудовлетворительной ударостойкости, являющиеся базой для обоснованного выбора направлений совершенствования технологии производства шаровых конвертерных сталей.

4. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются при подготовке магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия», что подтверждено соответствующей Справкой.

#### **Методология и методы исследования.**

Для изучения особенностей аэро- и гидродинамических процессов при верхней продувке расплава в большегрузных кислородных конвертерах, исследований распределения температурных полей в наконечнике кислородных фурм применяли усовершенствованные математические модели, основанные на применении общепринятых теоретических положений. Исследования параметров микроструктуры непрерывнолитых заготовок конвертерных сталей и производимых из них мелющих шаров проводили с использованием метода оптической микроскопии, применением стандартных методик полуколичественной оценки загрязненности стали неметаллическими включениями, определения размера зерна, а также визуальной оценки цифровых изображений структуры. Экспериментальные исследования характера и степени влияния режимов производства шаровой стали на показатели ее качества, а также влияния дефектов непрерывнолитых заготовок на ударную стойкость производимых из них мелющих шаров проводили в условиях действующего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Для исследования

влияния технологических параметров выплавки и внепечной обработки стали на ударостойкость производимых мелющих шаров использовали стандартные методики статистического анализа.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты численного моделирования процессов аэро- и гидродинамики расплава при выплавке шаровых сталей в большегрузных кислородных конвертерах при варьировании уровня и количества газошлаковой фазы.

2. Закономерности распределения температурных полей в объеме наконечников кислородных фурм различных конструкций.

3. Разработанные конструкции наконечников дутьевых устройств с центральным охлаждением, обеспечивающие повышение стойкости кислородных фурм и снижение затрат на производство шаровых сталей.

4. Усовершенствованные режимы конвертерной плавки и внепечной обработки шаровых сталей массового сортамента, обеспечивающие повышение показателей качества непрерывнолитых заготовок и производимых из них мелющих шаров.

5. Закономерности формирования параметров качества макро- и микроструктуры непрерывнолитых заготовок при использовании различных режимов выплавки и ковшевой обработки шаровых сталей.

6. Результаты исследований влияния дефектов непрерывнолитых заготовок на ударную стойкость производимых из них мелющих шаров.

7. Закономерности влияния технологических параметров выплавки и внепечной обработки конвертерных шаровых сталей массового сортамента на ударостойкость мелющих шаров, обобщенные в виде аналитических зависимостей.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту научной специальности 2.6.2. Metallurgy черных, цветных и редких металлов по следующим пунктам:

- п. 12 «Газо- и аэродинамика в металлургических агрегатах»;
- п. 17 «Пирометаллургические процессы и агрегаты»;
- п. 21 «Внепечная обработка металлов»;
- п. 26 «Математическое моделирование процессов производства черных, цветных и редких металлов, формирования техногенных месторождений и способов их утилизации. Управление и оптимизация металлургическими процессами».

**Личный вклад автора** заключается в разработке плана и личном участии в проведении теоретических и экспериментальных исследований процессов формирования качества стали для производства мелющих шаров; разработке и участии в опытно-промышленных исследованиях новых дутьевых и шлаковых режимов конвертерной плавки, режимов раскисления и внепечной обработки шаровой стали; проектировании новых конструкций наконечников кислородных фурм; обобщении результатов комплексных исследований,

формулировании основных выводов по работе.

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Подтверждением достоверности полученных результатов является: совместное использование методик теоретических и экспериментальных исследований, в том числе проведенных в условиях действующего промышленного производства; применение современного аналитического оборудования с программным обеспечением для цифровизации полученных данных в автоматическом режиме; качественное совпадение результатов исследований с общепринятыми теоретическими представлениями; наличие подтвержденного эффекта от использования разработанных технологических решений по оптимизации производства стали в условиях действующего кислородно-конвертерного цеха.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XXIII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2022 г.); XVII Международный конгресс сталеплавателей и производителей металла (г. Магнитогорск, 2022 г.); Международная научно-практическая конференция «Развитие производительных сил Кузбасса» (г. Кемерово, 2023 г.), VII Международная научно-практическая конференция «Новые вызовы – новые исследования» (г. Петрозаводск, 2024); 2-ая Конференция с международным участием «Качество стали 2024: от руды до проката» (г. Москва, 2024 г.); Международная научно-практической конференции «Научные революции как ключевой фактор развития науки техники» (г. Пермь, 2024 г.).

### **Публикации.**

По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 6 статей в журналах и сборниках трудов.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, двух приложений и изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 29 рисунков, 19 таблиц, список литературы из 145 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В рамках первой главы** проведен аналитический обзор современных тенденций производства сталей для мелющих шаров. Представлен анализ особенностей химического состава шаровых сталей отечественного и зарубежного производства, охарактеризованы основные требования к показателям качества мелющих шаров, закладываемых на стадии выплавки и внепечной обработки стали. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что преобладающая доля сталей для производства мелющих шаров в отечественной металлургии выплавляется в кислородных конвертерах. При этом объективно существует проблема недостаточной ударной стойкости производимых отечественных мелющих шаров из-за их пониженного металлургического качества – наличия дефектов металлургического

происхождения, переходящих в шары с исходных заготовок. Данный факт является обоснованием актуальности исследований по совершенствованию дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при производстве шаровых сталей, методов раскисления таких сталей и режимов их внепечной обработки. Показано, что распространение результатов многочисленных исследований, направленных на совершенствование технологии конвертерной плавки и ковшевой обработки специальных сталей, на конкретные металлургические цеха и агрегаты имеет существенные ограничения в связи со значительными конструкционными и технологическими особенностями последних. Это предопределяет необходимость проведения комплексных теоретических и экспериментальных исследований, направленных на решение проблемы по повышению качества шаровых сталей и металлургического качества производимых мелющих шаров. Результаты аналитического обзора позволили сформулировать задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** представлены результаты теоретических исследований, направленных на получение новой информации по совершенствованию дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки, а также на совершенствование конструкций дутьевых устройств.

Предварительно проведено численное моделирование по определению основных режимов взаимодействия кислородных струй с расплавом при верхней продувке 350-т конвертерной ванны кислородно-конвертерного цеха №2 (ККЦ-2) АО «ЕВРАЗ ЗСМ», определению особенностей циркуляции и газосодержания, накопления газа в подфурменной зоне при различных уровнях вспенивания шлака.

Численные исследования выполнены с использованием разработанной и усовершенствованной математической модели, согласно которой исследуемые газометаллическая и газошлаковая фазы являются газожидкостными средами и описываются следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_\rho}{\partial t} &= -(\vec{V}_\rho \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}_\rho + \nu_e \Delta \vec{V}_\rho + \zeta_e \vec{\nabla}(\vec{V}_\rho - \vec{\nabla}) + (1 - \alpha) \vec{g} - \vec{\nabla}_{\tilde{p}}, \\ \vec{\nabla} \vec{V}_\rho &= \Phi(\vec{V}_\rho, \alpha), \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} &= -\vec{V} \cdot (\alpha \vec{V}_\rho) + \Phi(\vec{V}_\rho, \alpha), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\vec{V}_\rho$  – барицентрическая скорость среды;  $\nu_e$  и  $\zeta_e$  – кинематическая и динамическая вязкости;  $\alpha$  – коэффициент объёмного газосодержания;  $\tilde{p}$  – динамическая составляющая давления, отнесённая к плотности несущей жидкой фазы (металла и шлака).

Эффективный источник газовой фазы в газожидкостной среде представлен выражением, полученным в пренебрежении динамической составляющей давления по сравнению с гидростатической:

$$\Phi(\vec{V}_\rho, \alpha) = \psi - \alpha \xi \rho \vec{g}(\vec{V}_\rho + \vec{W}_g) - \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{W}_g), \quad (2)$$

где  $\psi$  и  $\xi$ , – объёмный источник газовой фазы и логарифмическая производная плотности этой фазы по давлению;  $\vec{W}_g$  – диффузионная скорость.

Диффузионная скорость имеет конвективную ( $\vec{W}_g^c$ ) и турбулентную ( $\vec{W}_g^t$ )

составляющие. Первая из них имеет постоянное направление, определяемое ускорением свободного падения, а величина её задана непосредственно исходя из экспериментальных данных; турбулентная составляющая определяется, как:

$$\alpha \vec{W}_g^t = -D_g \vec{\nabla} \alpha. \quad (3)$$

где ( $D_g$ ) – эффективный коэффициент турбулентной диффузии газовой фазы.

Полученные данные о характере движения расплава (рисунок 1) свидетельствуют, что указанное движение происходит в замкнутом глобальном вихре. При этом распределение газовых включений существенно зависит от уровня шлака в конвертере. Так при относительно небольшом количестве вспененного шлака (рисунок 1 а) значительное количество газа, образующегося в объёме реакционной зоны, достигая свободной поверхности, покидает зону шлаковой фазы и лишь незначительная его доля затягивается обратно в шлак у стенок конвертера нисходящими потоками. С увеличением общего уровня вспененного шлака (рисунок 1 б) количество газа, не успевающего покинуть шлак, постепенно увеличивается, всплывающий газ вовлекается в глобальный общий вихрь, в результате чего его концентрация в центре вихря возрастает. Это приводит к прорывам оболочки газошлакометаллической эмульсии и свищевому выходу газовых объёмов на поверхность ванны.

Численным моделированием определены количественные характеристики относительных величин газосодержания в шлаке, то есть объёмной концентрации газа, рассчитанной по отношению к средней плотности газошлаковой эмульсии. По полученным данным заметное содержание газа в металле наблюдается только в области, примыкающей к реакционной зоне, где значение коэффициента объёмного газосодержания превышает 0,2. В шлаке газовые объёмы относительно равномерно распределены по высоте вблизи стенок конвертера, где значение коэффициента объёмного газосодержания составляет не более 0,1. В центре зоны вихря газосодержание превышает величину 0,25. Наиболее интенсивный выход газа со свободной поверхности шлака для исследованных уровней приходится на участок, соответствующий границе реакционной зоны. При этом в случае незначительного уровня вспененного шлака такой максимум наиболее выражен. В то же время с повышением уровня шлака высота такого пика уменьшается и он «растягивается» в сечении ванны в направлении к стенкам конвертера.

При совершенствовании представленной модели (уравнения 1-3) учитывали возможность выхода на поверхность ванны газообразных продуктов реакции при так называемом свищевом потоке с коэффициентом газосодержания в шлаке, близком к 1. Наличие таких зон способствует повышенному газосодержанию ванны на заключительном этапе продувки при незначительной скорости обезуглероживания и, соответственно, способствует повышенной окисленности металла.

Результаты численного моделирования гидродинамики расплава с использованием усовершенствованной модели показывают (рисунок 1 в), что при увеличении значения коэффициента общего объёмного газосодержания ( $\alpha_{\text{общ}}$ ) растворенный в ванне газ более интенсивно захватывается глобальным вихрем и распределяется вдоль стенок конвертера, накапливаясь и формируя на

этих участках застойные зоны. Тем не менее, наибольшая концентрация газовой фазы всё равно наблюдается в подфурменной зоне и в пределах реакционной зоны.

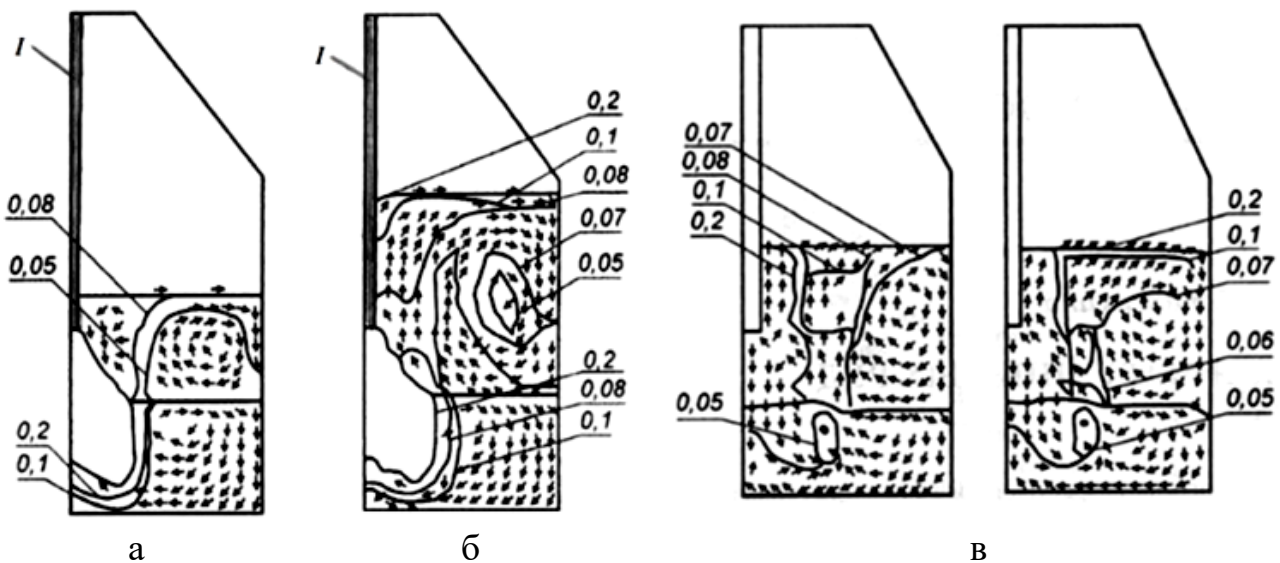


Рисунок 1 – Гидродинамика металлической и шлаковой фаз в рабочем пространстве конвертера при продувке через фурму ( $I$ ) в режиме «заглубленных» струй при уровне шлака в конвертере 1,5 м ( $a$ ) и 3,0 м ( $б$ ) и разных значений коэффициента общего объёмного газосодержания  $\alpha_{\text{общ}}$  ( $в$ ) (стрелки – направление скоростей; кривые – линии изоконцентраций газовой фазы; цифры – коэффициенты объёмного газосодержания)

Необходимо отметить, что в целом полученная информация качественно согласуется с ранее выполненными исследованиями по высокотемпературному моделированию процесса продувки металла в конвертерном агрегате и, поэтому, может быть использована при отработке дутьевого и шлакового режимов плавки шаровых сталей в большегрузном конвертере.

В дальнейшем с целью получения дополнительной информации и обоснования направлений совершенствования конструкций дутьевых устройств выполнено численное моделирование температурных полей в объеме головки фурмы и водоохлаждаемого соплового блока наконечника фурмы. Моделирование проведено с использованием метода элементарных тепловых балансов. Необходимо отметить, что при моделировании охлаждения нижней части сопел, прилегающих к торцевой поверхности фурмы, учитывался тепловой поток от реакционной зоны, а также тепловые потоки от всплесков металла и шлака.

Полученные данные о распределении температурных полей (рисунок 2) в вертикальных сечениях головки позволяют спрогнозировать механизм торцевого износа наконечников фурм при эксплуатации разработанных конструкций 5-ти и 6-ти сопловых фурм с центральным охлаждением. Установлено, что наибольшая вероятность разгара наконечника реализуется в его присопловой части.

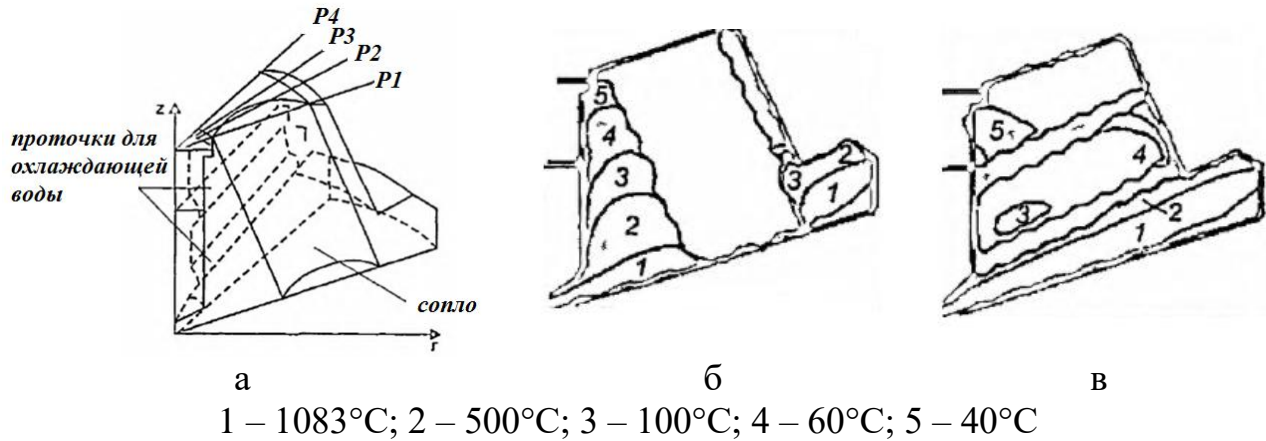


Рисунок 2 – Расчетная область (а) и распределение температурных полей (б, в) по результатам моделирования работы наконечника 6-ти сопловой фурмы с центральным охлаждением: б – область P1; в – область P4

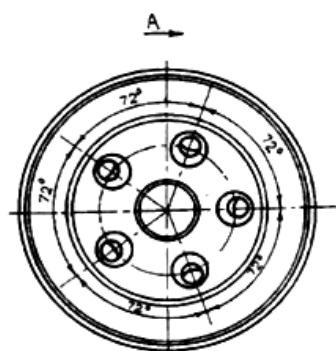
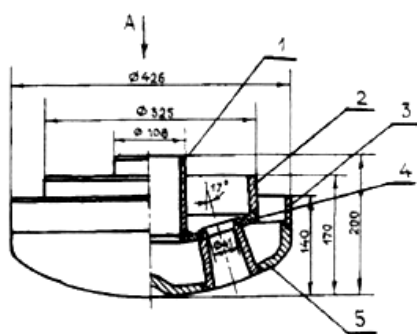
При проектировании конструкций головок дутьевых устройств использовали ранее полученные эмпирические выражения, связывающие глубину и диаметр реакционных зон с параметрами дутья:

$$\left. \begin{aligned} L_I^{max} (H_{\phi} + L_I^{max})^2 &= 133,3 \frac{i_k}{\rho_m g \cos \alpha}; \quad L_I^{min} (H_{\phi} + L_I^{min})^2 = 75,1 \frac{i_k}{\rho_m g \cos \alpha}; \\ D_I^{max} &= 3,09 \left( \frac{i_k}{\rho_m g L_I^{min}} \right)^{0,5}; \quad D_I^{min} = 2,68 \left( \frac{i_k}{\rho_m g L_I^{min}} \right)^{0,5}; \\ D_{II}^{max} &= 5,81 \left( \frac{i_k}{\rho_m g L_{II}^{min}} \right)^{0,5}; \quad D_{II}^{min} = 5,02 \left( \frac{i_k}{\rho_m g L_{II}^{max}} \right)^{0,5} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

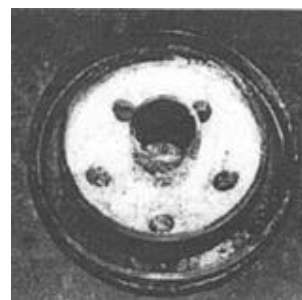
где  $L_I$  и  $L_{II}$  – длина первичной и вторичной реакционных зон соответственно;  $D_I$  и  $D_{II}$  – диаметр первичной и вторичной реакционных зон соответственно;  $H_{\phi}$  – высота фурмы над уровнем спокойной ванны;  $i_k$  – импульс одиночной кислородной струи;  $\rho_m$  – плотность металла;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha$  – угол наклона сопла к вертикали.

В разработанных вариантах конструкции 5-ти и 6-ти сопловой головок фурм (рисунки 3, 4) между верхней и нижней чашами равномерно по окружности под углом  $15^\circ$  к вертикальной оси фурмы посредством сварки закрепляются сопловые блоки, в каждом из которых выполняется по два сопла расчётных размеров и профиля с проточками для охлаждающей воды. Такая конструкция фурмы обеспечивает продувку с оптимальным расходом кислорода 900-1200 м<sup>3</sup>/мин при возможности расширения диапазона регулирования расхода до 600-1200 м<sup>3</sup>/мин за счёт изменения общей длины сопла без снижения эффективности продувки и стойкости головки фурмы, что в максимальной степени соответствует условиям работы цеха.

Разработанная проектно-техническая документация на усовершенствованную конструкцию кислородной фурмы передана в сталеплавильное производство АО «ЕВРАЗ ЗСМК», что подтверждено Справкой об использовании в производстве результатов диссертации.



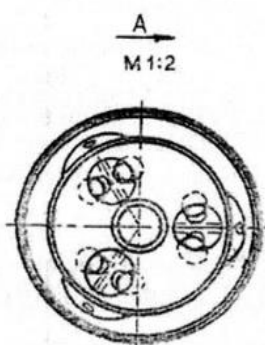
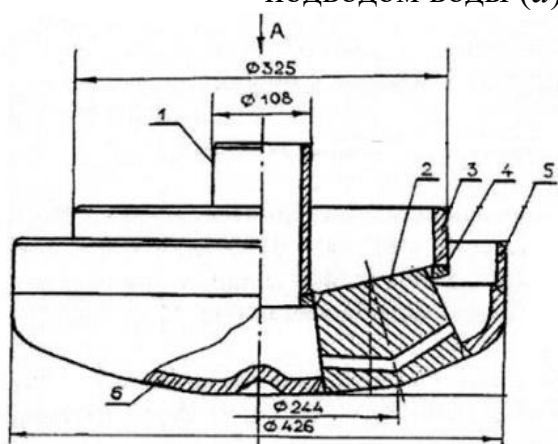
а



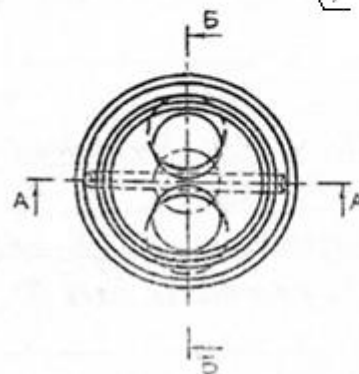
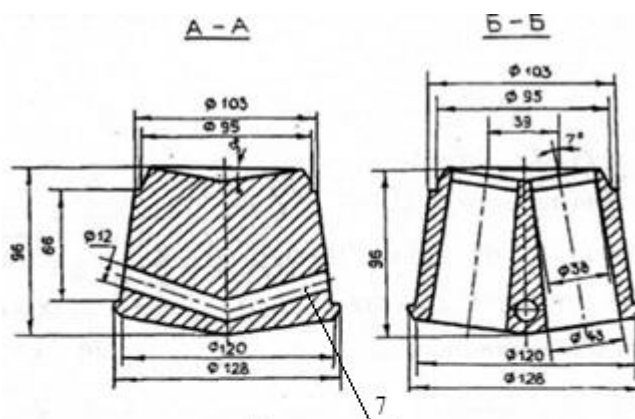
б

1 – труба для подвода охлаждающей воды; 2 – разделительная труба;  
3 – внешняя труба; 4 – обойма; 5 – сопло; 6 – чаша

Рисунок 3 – Конструкция 5ти сопловой головки фурмы с центральным подводом воды (а) и внешний вид наконечника (б)



а



б

1 – труба для подвода охлаждающей воды; 2 – сопловый блок; 3 – разделительная труба; 4 – обойма; 5 – внешняя труба; 6 – чаша; 7 – проточка

Рисунок 4 – Конструкция 6-сопловой головки кислородной фурмы с блочным расположением сопел (а) и соплового блока фурмы (б)

Эффективность применения фурм новой конструкции проявляется в повышении их стойкости за счет снижения вероятности прогара головки по сварным швам, расположенных на поверхности внешней чаши. Кроме того, использование фурм усовершенствованной конструкции позволит стабилизировать дутьевой и шлаковый режимы конвертерной плавки и положительно скажется на качестве стали.

**Третья глава** посвящена совершенствованию режимов выплавки и внепечной обработки шаровых сталей для условий дальнейшей разливки на сортовой МНЛЗ.

Согласно усовершенствованному режиму выплавки шаровых сталей определен расход чугуна в пределах не менее 900 кг/т стали, что позволяет обеспечить по окончании продувки расплава на выпуске из агрегата содержание углерода в металле не менее 0,45-0,55%. При этом продувка в период ускоренного формирования шлака ведётся при постепенном понижении положения фурмы до высоты 3,5-2,0 м, после чего в период интенсивного обезуглероживания фурма опускается в рабочее положение до 1,0-1,3 м (рисунок 5).

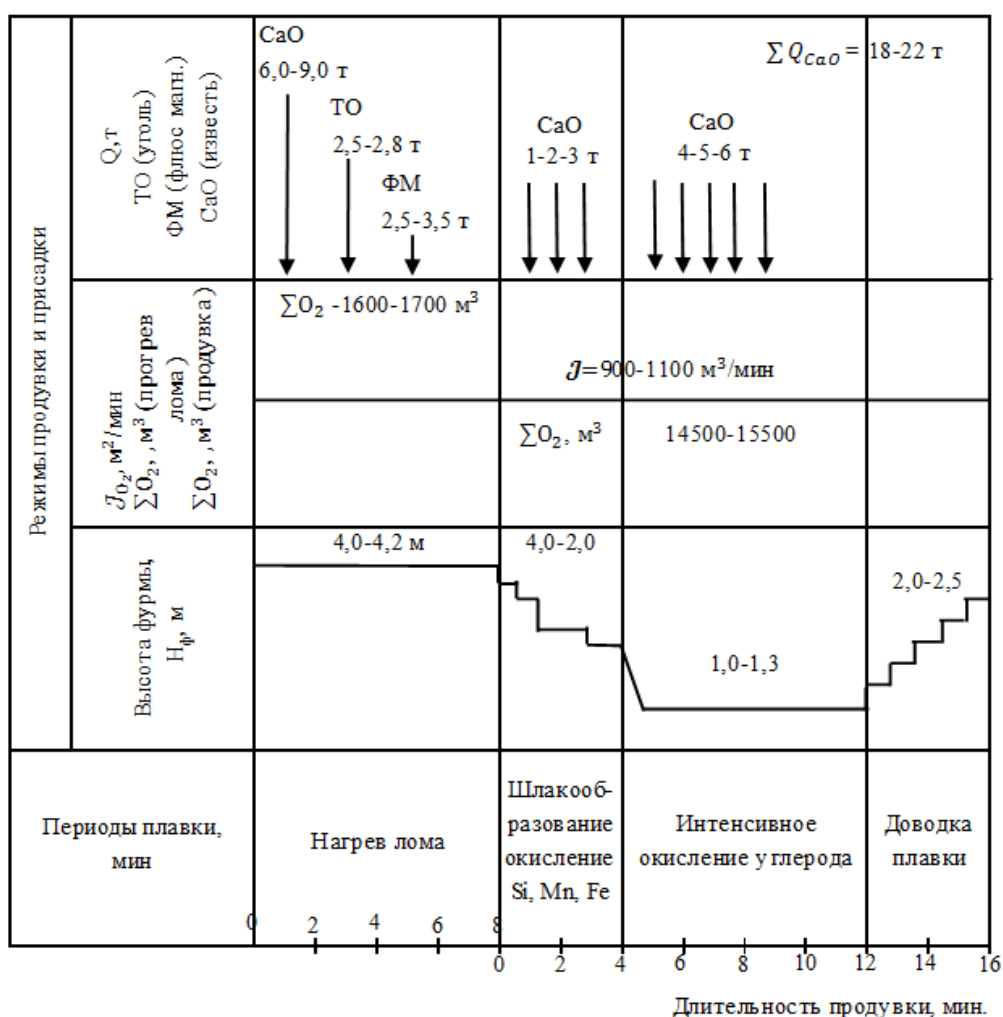
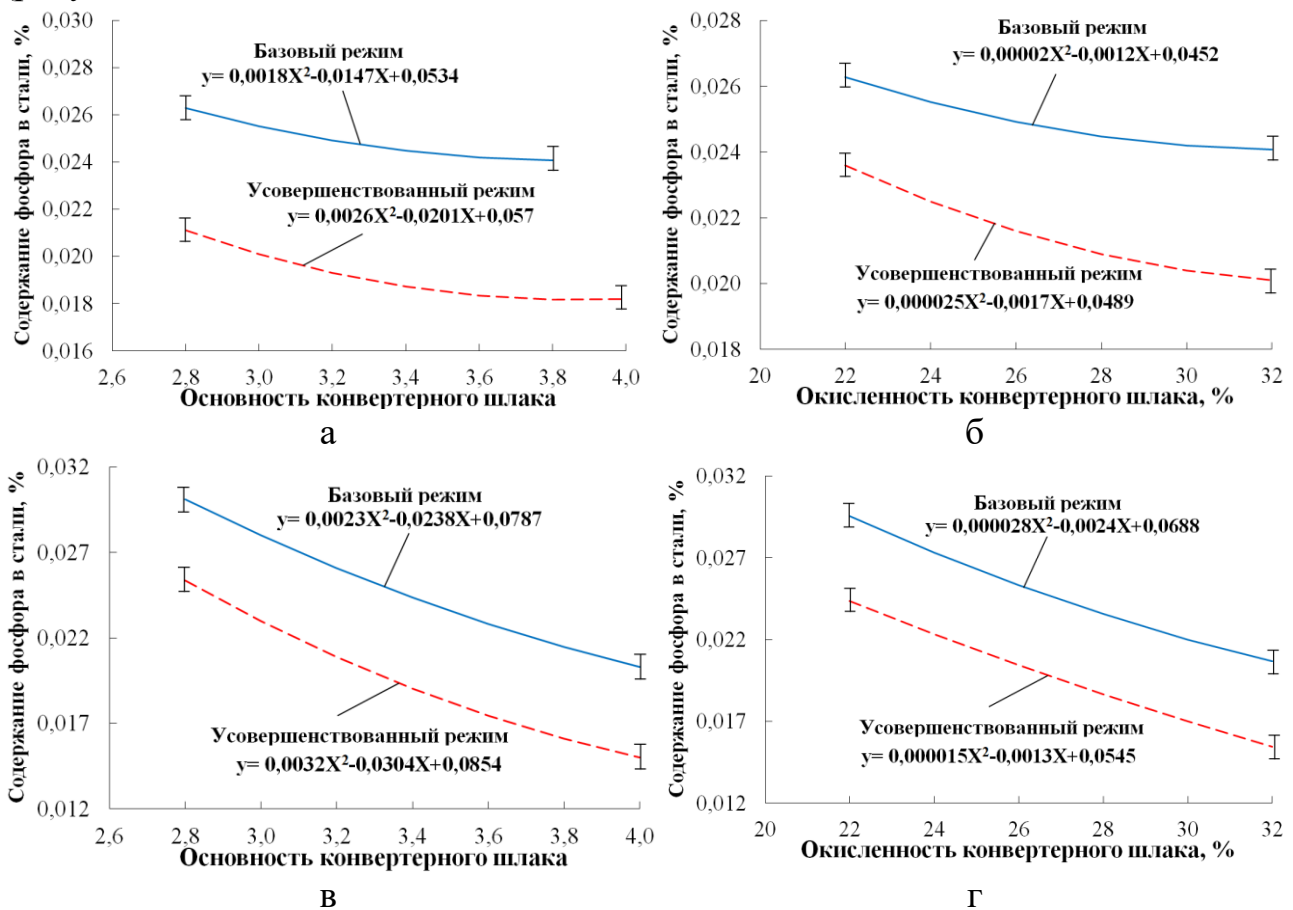


Рисунок 5 – Усовершенствованный режим присадки сыпучих материалов и кислородной продувки ванны 350-т конвертера при выплавке шаровой стали

В дальнейшем по достижении общего количества израсходованного

кислорода на продувку в пределах 10000-11000 м<sup>3</sup> положение фурмы изменяется с постепенным повышением до высоты 1,5-2,5 м и периодическим подъёме вверх при увеличении общего количества шлака и его вспенивании. Плавка заканчивается при положении фурмы выше рабочего на 1,0-1,5 м. Общий расход кислорода на продувку, как правило, составляет 14000-15500 м<sup>3</sup>. Основное количество извести, необходимой на плавку (до 60%), присаживают до начала жидкого периода при прогреве металлолома и в дальнейшем известь вводится порционно по ходу продувки после «зажигания» плавки вплоть до 10-12 минут от начала продувки (порциями по 1,0-5,0 т). При этом количество присаживаемой извести и магнезильного флюса рассчитывается в зависимости от химического состава и расхода жидкого чугуна для обеспечения получения жидкоподвижного однородного конечного шлака с основностью не менее 2,5.

Результаты опытно-промышленного опробования усовершенствованного режима выплавки шаровых сталей марок Ш2.1 и Ш2.3 обеспечивают возможность снижения содержания фосфора в стали на выпуске из конвертера при аналогичных параметрах основности и окисленности конвертерного шлака (рисунок 6).



а, б – сталь Ш2.1; в, г – сталь Ш2.3

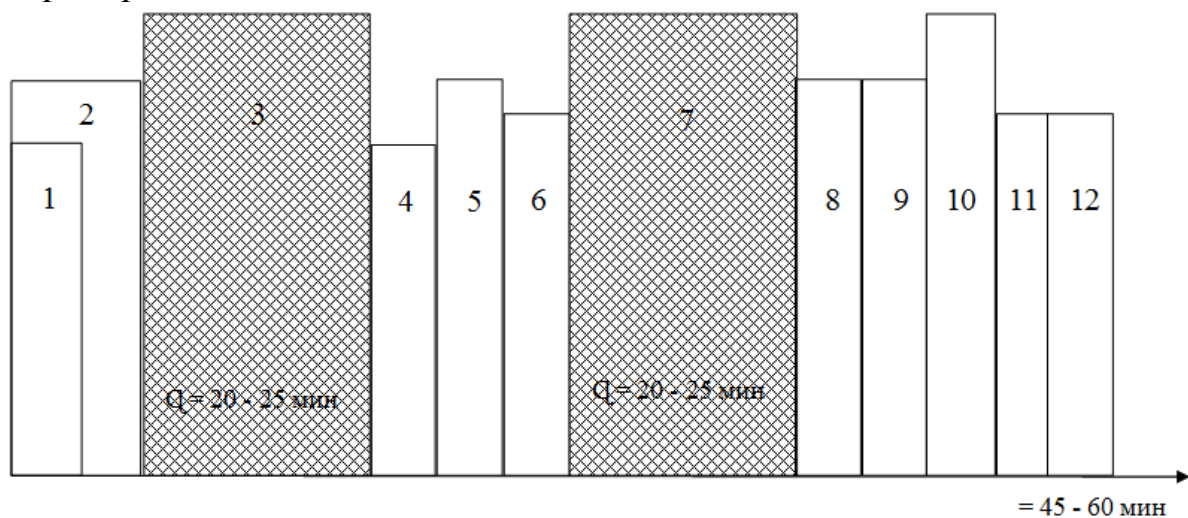
Рисунок 6 – Содержание фосфора в стали на выпуске из конвертера в зависимости от параметров шлака и режимов плавки

При этом следует отметить, что указанное снижение содержания фосфора в металле на повалке достигнуто не смотря на повышение удельного расхода чугуна, являющегося основным источником фосфора в металле, на величину

порядка 50 кг/т. Касательно других показателей качества шаровых сталей на выпуске из конвертера (содержание серы, окисленность металла) можно отметить, что значимые их изменения при использовании усовершенствованных режимов плавки отсутствовали.

Оптимизированная технология ковшевой обработки шаровых сталей с последующей разливкой на МНЛЗ включает последовательную обработку на установке доводки металла и агрегате «ковш-печь». При этом выбор режима обработки на установке доводки металла в значительной степени зависит от состояния шлака. При вспененном шлаке производится предварительное его раскисление и продувка расплава аргоном через донные фурмы в течение 6 мин. с дальнейшим замером окисленности стали. При нормальном состоянии шлака первой технологической операцией обработки является предварительная донная продувка, по завершении которой производится замер окисленности стали с последующим раскислением шлака.

Основными технологическими особенностями внепечной обработки расплава на агрегате «ковш-печь» (рисунок 7) являются: выполнение определенного режима продувки инертным газом по периодам с различной интенсивностью и выделение двух отдельных периодов электродугового подогрева расплава в ковше.



- 1 – замер толщины слоя шлака; 2 – продувка аргоном (расход 5-30 м<sup>3</sup>/час);  
 3 – первый цикл нагрева металла; 4 – наведение шлака для десульфурации металла; 5 – замер температуры, отбор проб металла и шлака, продувка аргоном; 6 – корректировка химического состава металла; 7 – второй цикл нагрева металла; 8 – отбор проб, замер температуры, продувка аргоном; 9 – усреднительная продувка аргоном; 10 – ввод порошковой проволоки с SiCa, продувка аргоном; 11 – замер температуры, отбор проб, продувка аргоном; 12 – покрытие зеркала металла теплоизолирующим слоем

Рисунок 7 – Технологические стадии режима обработки шаровой стали на агрегате «ковш-печь»

Применение усовершенствованных режимов ковшевой обработки стали позволяет значительно (в среднем на 15%) повысить степень десульфурации металла при обработке на установке «ковш-печь» при аналогичных расходах

известии для текущего сортамента плавок, разливаемых на МНЛЗ (рисунок 8).

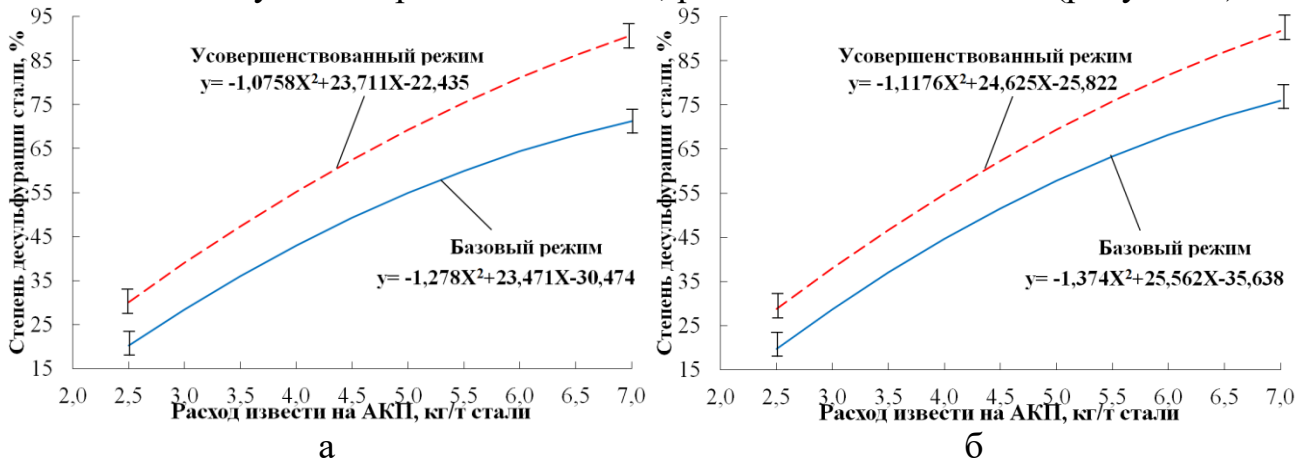


Рисунок 8 – Степень десульфурации сталей Ш2.1 (а) и Ш2.3 (б) в зависимости от режима обработки на агрегате «ковш-печь»

Таким образом, можно сделать вывод, что использование предложенных режимов выплавки и внепечной обработки шаровых сталей марок Ш2.1 и Ш2.3 позволяет обеспечить возможность повышения их качества (снижение содержания фосфора и серы) без увеличения расходов на производство стали.

**В четвертой главе** представлен комплекс исследований, направленных на изучение влияния режимов и конкретных технологических параметров выплавки и внепечной обработки шаровых сталей на параметры качества структуры непрерывнолитых заготовок, металлургическое качество и эксплуатационные характеристики производимых из них мелющих шаров.

В рамках указанного комплекса исследований на первом этапе с использованием методик металлографического и рентгеноспектрального анализа, подтверждено положительное влияние усовершенствованных дутьевых и шлаковых режимов плавки (рисунок 5) и режимов внепечной обработки шаровых сталей (рисунок 7) на параметры качества непрерывнолитых заготовок.

Установлено, что при использовании усовершенствованных режимов производства шаровых сталей имеет место уменьшение загрязненности непрерывнолитых заготовок неметаллическими включениями оксидного и силикатного типов (таблица 1). Данный положительный эффект обусловлен уменьшением окисленности стали на выпуске из конвертера, достигнутым за счет применения усовершенствованного режима продувки расплава с остановкой продувки на заданном высоком содержании углерода и повышении эффективности рафинирования стали от неметаллических включений при использовании предложенного режима продувки инертным газом.

Определено, что применение оптимизированных режимов производства и обработки шаровых сталей также позволяет уменьшить развитие химической неоднородности по сечению заготовок. Зафиксированное снижение степени ликвации по углероду, сере и фосфору (таблица 2) обусловлено улучшением условий для гомогенизации расплава при совершенствовании режимов продувки инертным газом в ковше.

Таблица 1 – Сравнительный анализ загрязненности непрерывнолитых заготовок шаровых сталей неметаллическими включениями

Технология производства стали	Относительная концентрация неметаллических включений, минимальный / максимальный баллы по ГОСТ 1778-2022			
	оксиды точечные	оксиды строчечные	силикаты недеформирующиеся	сульфиды
базовая	1a / 3a	1б / 3б	1б / 3б	1a / 2б
новая	- / 1a	- / 1б	1a / 1б	1a / 1б

Таблица 2 – Ликвация по сечению заготовок шаровых сталей

Технология производства стали	Относительная степень ликвации по зонам кристаллизации непрерывнолитых заготовок, %								
	корковая зона			столбчатых кристаллов			Центральная зона		
	C	S	P	C	S	P	C	S	P
базовая	-3	-8	-9	4	10	12	16	48	41
новая	-2	-10	-8	3	9	14	12	31	26

Установлен факт снижения интенсивности образования флокенов в заготовках плавок, произведенных с применением усовершенствованных режимов выплавки и внепечной обработки (таблица 3). Данный эффект, очевидно, связан со снижением содержания водорода в стали, которое в свою очередь обусловлено проведенной оптимизацией дутьевого и шлакового режимов плавки (исключение ввода шлакообразующих материалов, вносящих водород, в конце плавки) и режимов продувки инертным газом в ковше (повышение интенсивности продувки инертным газом).

Таблица 3 – Интенсивность образования флокенов в заготовках шаровых сталей от плавок, произведенных с использованием различных технологий

Технология производства стали	Доля непрерывнолитых заготовок с флокенами, %		Среднее содержание водорода в стали, ppm	
	Ш2.1	Ш2.3	Ш2.1	Ш2.3
базовая	7,2	8,5	5,1	4,8
новая	3,8	4,1	3,5	3,7

С целью оценки степени влияния дефектов непрерывнолитых заготовок на ударную стойкость мелющих шаров проведен промышленный эксперимент, в соответствии с планом которого произведена опытная прокатка заготовок с внутренними дефектами и заготовок без обнаруженных дефектов в мелющие шары. При этом с целью учета влияния на ударостойкость шаров дополнительных факторов закалка шаров проводилась по трем режимам, обеспечивающим формирование различных вариантов микроструктуры: режим с оптимальной скоростью охлаждения; режим, обеспечивающий «сквозную» прокаливаемость; режим с пониженной скоростью охлаждения,

обеспечивающий «сквозную» прокаливаемость. Готовые шары подвергали испытаниям на ударную стойкость на копровой установке.

Результаты экспериментальных исследований (таблица 4) свидетельствуют о том, что наличие в шарах дефектов макроструктуры в виде флокенов оказывает превалирующее влияние на снижение их ударной стойкости. При этом влияние дефектов микроструктуры (химическая неоднородность, скопления неметаллических включений, несплошности) хотя и является менее выраженным по отношению к флокенам, но в количественном отношении также значительно и поэтому уменьшение развития указанных дефектов в заготовках является значимым резервом повышения эксплуатационных характеристик мелющих шаров.

Таблица 4 – Влияние параметров макро- и микроструктуры непрерывнолитых заготовок на ударную стойкость получаемых шаров

Режим закалки	Доля мелющих шаров, не выдержавших копровые испытания, %					
	диаметр 60 мм			диаметр 50 мм		
	из заготовок с флокенами	из заготовок с дефектами микро- структуры	из заготовок без дефектов	из заготовок с флокенами	из заготовок с дефектами микро- структуры	из заготовок без дефектов
№1	100	9,3	0	100	14,4	0
№2	100	10,2	0	100	15,3	0
№3	100	7,6	0	100	17,1	0

В дальнейшем проведены статистические исследования влияния технологических параметров выплавки и ковшевой обработки шаровых сталей в рамках различных режимов их производства на ударную стойкость мелющих шаров. В качестве объекта исследований использованы две выборки плавок шаровых сталей ККЦ-2, произведенные с использованием базового и усовершенствованного режимов конвертерной плавки и внепечной обработки стали.

Установлено, что вне зависимости от используемой технологии производства шаровой стали, снижению отбраковки шаров при их ударных испытаниях способствуют: уменьшение окисленности стали на выпуске из конвертера, снижение содержания серы в готовой стали, увеличение длительности продувки инертным газом при обработке на агрегате «ковш-печь» и уменьшение концентрации водорода в стали после внепечной обработки.

Уравнение регрессии применительно к базовой технологии производства стали имеет вид:

$$B_K = 4,9 + 0,015[O] + 84,6[S] - 0,024t_{\text{прод}} + 430[H], \quad (5)$$

где  $B_K$  – отбраковка шаров по результатам копровых испытаний на ударную стойкость, %;  $[O]$  – окисленность стали на выпуске из конвертера, ppm;  $[S]$  – содержание серы в готовой стали, %;  $t_{\text{прод}}$  – продолжительность продувки аргоном при обработке стали на агрегате «ковш-печь», мин;  $[H]$  – содержание водорода в стали, ppm.

Установленное влияние повышенной окисленности стали на снижение ударостойкости шаров обусловлено увеличением концентрации оксидных и силикатных неметаллических включений в заготовках и в получаемых из них мелющих шарах. Выявленное влияние повышенного содержания серы в металле на снижение устойчивости мелющих шаров к ударным нагрузкам, очевидно, связано с формированием сульфидных неметаллических включений, скопления которых в локальных зонах приводят к расколу шаров. Установленный факт положительного влияния увеличения длительности продувки расплава инертным газом в процессе внепечной обработки на ударостойкость мелющих шаров связан со снижением химической неоднородности в объеме металла в ковше при увеличении работы перемешивания, а также с интенсификацией флотационных процессов, способствующих всплыванию неметаллических включений из металла в шлак и с повышением степени дегазации стали, в том числе с увеличением количества удаляемого из расплава водорода. Влияние повышенного содержания водорода в стали на снижение ударной стойкости шаров, очевидно, связано с увеличением вероятности образования флокенов, выступающих в роли концентраторов напряжений при ударных нагрузках и поэтому способствующих расколу шаров.

Совокупный коэффициент детерминации, отражающий степень суммарного относительного влияния вышеприведенных параметров производства и обработки стали на ударостойкость мелющих шаров, составил 0,73 (73%).

По полученным данным применительно к усовершенствованным режимам выплавки и внепечной обработки шаровой стали превалирующее влияние на отбраковку производимых шаров оказывают содержание кислорода в стали на выпуске из конвертера и концентрация серы в готовой стали. При этом влияние данных факторов на отбраковку шаров имеет ярко выраженный нелинейный характер – при превышении критических значений содержания кислорода и серы в стали (100 ppm и 0,011% соответственно) отбраковка шаров резко возрастает (рисунок 9).

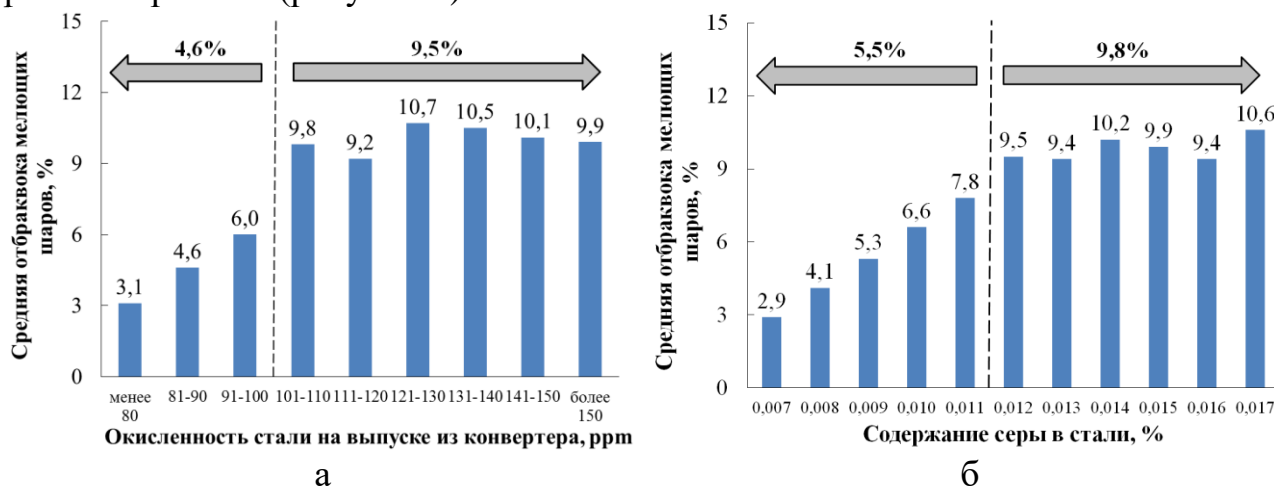


Рисунок 9 – Влияние окисленности стали на выпуске из конвертера (а) и содержания серы в готовой стали (б) на отбраковку мелющих шаров

### Заключение

1. Численным моделированием процесса продувки расплава в большегрузном кислородном конвертере определены закономерности движения газоплакометаллической среды в объёме рабочего пространства, механизмов накопления газа в подфурменной зоне и выхода продуктов реакции на поверхность ванны, являющиеся теоретической базой для совершенствования дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки шаровых сталей.

2. На основании результатов моделирования распределения температурных полей в наконечнике кислородных фурм и с использованием известных методик проектирования дутьевых устройств разработаны варианты 6-ти сопловых кислородных фурм с центральным охлаждением, обеспечивающие повышение их стойкости и снижение материалоемкости процесса выплавки сталей в целом. Проектно-техническая документация на указанные фурмы передана в кислородно-конвертерный цех №2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК», что подтверждено Справкой об использовании в производстве результатов диссертации.

3. Применительно к условиям кислородно-конвертерного цеха №2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» разработаны и усовершенствованы дутьевой и шлаковый режимы конвертерной плавки шаровых сталей. Показано, что увеличение расхода чугуна на выплавку стали до 900 кг/т совместно с применением трехступенчатого режима продувки и остановкой продувки на повышенном содержании углерода позволяют повысить эффективность дефосфорации стали.

4. Проведено совершенствование режимов комплексной внепечной обработки шаровых сталей на установке доводки металла и агрегате «ковш-печь» кислородно-конвертерного цеха №2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Дифференциация режимов обработки на установке доводки металла в зависимости от состояния шлака, а также варьирование интенсивности продувки инертным газом расплава в процессе обработки на агрегате «ковш-печь» позволили повысить степень десульфурации стали без увеличения расходов на проведение данной операции.

5. На основании комплексных исследований, проведенных с использованием методик металлографического, рентгеноспектрального и статистического анализа, установлено положительное влияние разработанных и усовершенствованных режимов выплавки и ковшевой обработки шаровых сталей в кислородно-конвертерном цехе №2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» на параметры качества непрерывнолитых заготовок и ударную стойкость производимых из них мелющих шаров. Результаты внедрения усовершенствованных режимов производства шаровых сталей массового сортамента в АО «ЕВРАЗ ЗСМК» свидетельствуют о снижении отбраковки мелющих шаров по результатам их испытаний на ударную стойкость в среднем на 3% (подтверждено Справкой об использовании в производстве результатов диссертации).

6. Исследованиями влияния технологических параметров выплавки и ковшевой обработки стали на металлургическое качество мелющих шаров и их ударную стойкость обоснованы направления дальнейшего совершенствования

режимов производства шаровых сталей. В частности определены пороговые значения концентрации кислорода в стали на выпуске из конвертерного агрегата и содержания серы в готовой стали, превышение которых приводит к значительному увеличению отбраковки готовых шаров из-за наличия дефектов металлургического происхождения.

7. Результаты исследований, полученных в рамках диссертационной работы, внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются при подготовке магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия», что подтверждено соответствующей Справкой.

### **Список публикаций по теме диссертационной работы**

#### ***Статьи в журналах из перечня ВАК***

1. Анализ влияния химического состава и металлургического качества мелющих шаров на их эксплуатационные свойства / А. А. Уманский, **И. С. Морозов**, Е. В. Протопопов, С. О. Сафонов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2023. – Т. 79. – № 6. – С. 484-495.

2. Математическая модель режимов взаимодействия кислородных струй с расплавом при верхней продувке конвертерной ванны / Е. В. Протопопов, А. А. Уманский, **И. С. Морозов**, М. К. Шакиров // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2023. – № 3 (45). – С. 87-93.

3. Анализ природы происхождения характерных дефектов мелющих шаров из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовой стали / А. А. Уманский, **И. С. Морозов**, Е. В. Протопопов, А. С. Симачев, Л. В. Думова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2023. – Т. 66. – №2. – С. 222-228.

4. Совершенствование технологии выплавки и внепечной обработки конвертерных сталей для производства мелющих шаров / **И. С. Морозов**, А. А. Уманский, Е. В. Протопопов, А. С. Симачев // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2024. – № 1 (47). – С. 127-134.

#### ***Публикации в журналах и сборниках трудов***

5. Анализ взаимосвязи качества структуры непрерывнолитых заготовок шаровых сталей с эксплуатационными характеристиками мелющих тел / А. А. Уманский, Е. В. Протопопов, **И. С. Морозов**, А. С. Симачев, Л. В. Думова // Сборник трудов XXIII Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». – Новокузнецк: Издательский Центр СибГИУ, 2022. – С. 29-34

6. Математическое моделирование тепловой работы головки кислородной фурмы для продувки в большегрузных конвертерах / Е. В. Протопопов, А. А. Уманский, **И. С. Морозов**, Н. А. Чернышева // Сборник трудов XXIII Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество». – Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2022. – С. 13-20.

7. Анализ влияния металлургического качества мелющих шаров на их ударную стойкость / А. А. Уманский, **И. С. Морозов**, Е. В. Протопопов, А. С. Симачев // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2022. – Вып. 25. – С. 30-37.

8. Влияние параметров макроструктуры заготовок шаровых конвертерных сталей на ударную стойкость мелющих шаров / А. А. Уманский, **И. С. Морозов**, Е. В. Протопопов, А. С. Симачев // Сборник трудов XVII Международного конгресса сталеплавыльщиков и производителей металла ««От руды до стали - ISCON-2023». – Магнитогорск, 2023. – С. 158-162.

9. Уманский, А. А. Влияние параметров выплавки и внепечной обработки специализированных конвертерных сталей на эксплуатационные характеристики производимых из них мелющих шаров / А. А. Уманский, **И. С. Морозов** // Сборник статей VII Международной научно-практической конференции «Новые вызовы – новые исследования. – Петрозаводск: МЦНП «НОВАЯ НАУКА», 2024. – С. 55-59.

10. **Морозов, И. С.** Разработка и совершенствование режимов выплавки и комплексной внепечной обработки сталей для производства мелющих шаров / И. С. Морозов, А. А. Уманский // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Научные революции как ключевой фактор развития науки и техники». – Стерлитамак: АМИ, 2024. – С 59-63.

Подписано в печать      2024. Формат 60x84 1/16

Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в Издательском центре СибГИУ

654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный р-н,  
ул. Кирова, зд. 42