

Министерство образования и науки  
Донецкой Народной Республики  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Донецкий национальный технический университет»

*На правах рукописи*

**Бабанин Анатолий Яковлевич**

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И ТЕХНОЛОГИИ ВНЕПЕЧНОЙ  
ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

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

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Донецк-2016

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Макеевка.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**Белоусов Вячеслав Владимирович**,  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»  
(г. Донецк), заведующий кафедрой «Физика  
неравновесных процессов, метрология и экология»

**Официальные  
оппоненты:**

**Ведущее  
предприятие:**

Защита состоится \_\_\_\_ 2016 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 01.019.03 при ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, малый актовЫй зал. Тел.: +380 (62) 304-30-55., эл. почта: vchenarada@donntu.org

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус, интернет – <http://donntu.org>

Автореферат разослан \_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 01.019.03,  
д.т.н., проф.

А.В. Яковченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время, практически все конструкционные стали (судовые и железнодорожные, (колесные), автомобильные и кордовые, строительные и стали для магистральных газонефтепроводов) проходят внепечную обработку. Изготовление и применение более современной техники, технологических комплексов и оборудования, повышение номинального рабочего давления в магистралах для увеличения производительности газонефтетранспортных систем и разработка месторождений в более жестких климатических условиях (крайний Север, западная Сибирь), обуславливают необходимость обеспечения строителей, машиностроителей и других потребителей конструкционными сталями более высокого качества.

В мировой практике за последние три десятилетия технология внепечной обработки конструкционных сталей (КС) претерпела значительное усовершенствование в повышении чистоты металла по вредным примесям, газам и неметаллическим включениям (НВ). Анализ технологий внепечной обработки и качества конструкционных сталей свидетельствует, что существенное влияние на формирование механических и служебных свойств металла оказывает размер и количество остаточных НВ и их структурно-химическое состояние. Базовым звеном, определяющим вышеуказанные параметры, является технологический участок: выпуск металла из конвертера - кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), включающий агрегат ковш-печь (АКП) с обработкой стали высокоактивными реагентами (ВАР) и ковшовой вакууматор (КВ).

Многофакторность влияния физико-химических, массообменных, теплофизических и гидродинамических процессов на обработку стали ВАР, особенно трудно контролируемая в агрегатах большой вместимости, не всегда позволяет обеспечить заданное остаточное содержание НВ, их размер и структурно-химическое состояние. Неучтенность влияния данных процессов на образование первичных неметаллических включений, их модифицирование и трансформацию в процессе вторичного окисления от взаимодействия с кислородом воздуха, ковшевым шлаком в сталеразливочном ковше (СК), покровным шлаком в промежуточном ковше (ПК) и их футеровкой, не позволяет в полной мере обеспечить более высокое качество металла. Может приводить к ее ухудшению за счет снижения положительного влияния микролегирующего, модифицирующего и рафинирующего действия ВАР, повышению загрязненности металла НВ в результате их окисления и повышенной отсортировке толстого листа.

Исходя из этого, развитие научных основ и технологии внепечной обработки конструкционных сталей, обеспечивающей более высокое качество металла, разработка алгоритма ее воспроизводства по обеспечению минимального остаточного содержания, размера и заданного структурно-химического состояния НВ, является актуальной проблемой, решение которой имеет важное научно-техническое и практическое значение. Это позволит снизить отрицательное влияние НВ, повысить механические и служебные свойства готового проката, снизить его отсортировку по УЗК и тем самым обеспечить значительный экономический эффект.

**Степень разработанности темы.** Вопросы, решаемые в данной работе, посвящены технологии внепечной обработке конструкционных сталей и направлены на повышение их механических и служебных свойств. Данные технологии начали разрабатываться в 80-х годах XX века, а широкое распространение получили в странах СНГ только к середине 90-х, когда было организовано промышленное производство порошковых проволок с высокоактивными реагентами. Практический опыт применения данных технологий свидетельствует, что остаются не до конца раскрытыми, наряду с обеспечением низкого содержания вредных примесей и газов, вопросы обеспечения заданного остаточного содержания, размера и структурно-химического состояния НВ, их совокупное влияние на механические и служебные свойства готового металла.

Разработке и применению данных технологий посвящено большое количество научных и практических работ отечественных и зарубежных исследователей (среди них следует выделить Григоровича К.В., Каблуковского А.Ф., Зайцева А.И., Трефилова В.И., Позняка Л.А., Дюдкина Д.А., Харлашина П.С., Вихлевщук В.А., Белова Б.Ф., Белоусова В.В., Носоченко О.В., Мори Т., Турдогана Е.Т. и др.), и которые обеспечивают высокую степень усвоения и эффективность рафинирующего действия вводимых высокоактивных реагентов, и которые являются хорошей базой для развития научных основ и разработки более совершенной технологии внепечной обработки.

**Цель и задачи исследований.** Целью данной работы является развитие научных и технологии внепечной обработки конструкционных сталей на технологическом участке: выпуск металла из конвертера - кристаллизатор МНЛЗ в агрегатах большой вместимости (350 тонн) с учетом особенностей протекающих в них физико-химических, термодинамических, гидродинамических и теплофизических процессов, для обеспечения высоких механических и служебных свойств готового проката.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать особенности образования первичных НВ в КС в сталеразливочном ковше при раскислении марганцем, кремнием и алюминием в процессе выпуска плавки из конвертера и оценить их влияние на качество готового проката.

2. Разработать методику физического моделирования гидродинамических процессов в сталеразливочном ковше на АКП при усреднительной продувке аргоном, провести исследования и получить уравнение регрессии для определения площади открытой поверхности металла расчетным путем по технологическим параметрам продувки.

3. Разработать методику и провести высокотемпературные исследования химического взаимодействия жидкой металло-шлаковой системы Ca-Al-Si и CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> для определения закономерностей изменения структурно-химического состояния НВ при их модифицировании высокоактивными реагентами.

4. Методом теории МГС-фаз (модель гармоничных структур) выполнить анализ структурно-химического состояния неметаллических включений:

- первичных, образующихся в ковше в процессе выпуска плавки;
- модифицированных высокоактивными реагентами;

- трансформированных в результате вторичного окисления;
- алюминатов кальция и их способности к гидратации и гидрогенизации.

5. Исследовать изменение структурно-химического состояния ковшевого и покровного шлаков, соответственно в сталеразливочном ковше на АКП и промежуточном ковше на МНЛЗ под влиянием вводимых в сталь высокоактивных реагентов и химического состава футеровки ковша.

6. Определить закономерности изменение содержания кальция и алюминия на технологическом участке АКП-МНЛЗ и их влияние на изменение структурно-химического состояния НВ.

7. Разработать математическую модель циркуляционных потоков металла в ПК МНЛЗ и исследовать закономерности поточного рафинирования стали от НВ под воздействием гидродинамических и барботажных процессов.

8. Развить научные основы и комплексную ресурсо- и энергосберегающую технологию, и реализовать ее частные технологические операции:

- технология снятия переокисленности металла мелкокусковым углеродсодержащим материалом в процессе выпуска плавки;
- рациональная технология раскисления стали в сталеразливочном ковше в процессе выпуска плавки;
- технология внепечной обработки конструкционной трубной стали в сталеразливочном ковше на АКП с исключением вторичного окисления металла через открытую поверхность;
- технология поточного рафинирования металла от НВ в промежуточном ковше МНЛЗ;
- технология совместного рафинирования стали шлаковыми смесями и порошковыми модификаторами в сталеразливочном ковше.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследований являются процессы, протекающие в агрегатах на технологическом участке выпуск: металла из конвертера – кристаллизатор МНЛЗ, а предметом - влияние физико-химических, термодинамических, теплофизических и гидродинамических процессов на рафинирование стали, образование, модифицирование и трансформацию неметаллических включений.

**Научная новизна полученных результатов.**

**1. Получили дальнейшее развитие научные основы проектирования сквозного технологического процесса внепечной обработки конструкционных сталей в агрегатах большой вместимости (350-тонн), основанные на принципах управления модифицированием и трансформацией неметаллических включений на основе анализа их структурно-химического состояния.**

Научно обоснован, разработан и адаптирован к условиям модернизированного сталеплавильного комплекса сквозной технологический процесс кислородный конвертер-АКП-КВ-МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком, обеспечивающий содержание серы – 0,001-0,002%, водорода – до 1,5-2,0 ppm, азота – до 4-6 ppm, НВ тонкой серии – до 1,0 балла, снижение осевой и точечной неоднородности, улучшение равномерности макро и микроструктуры сляба по малому и большому радиусу, повышение механических и служебных свойств.

**2. На основе дальнейшего развития представлений о барботажных процессах, протекающих в сталеразливочном ковше на АКП при продувке металла аргоном, для определения площади открытой поверхности металла от технологических параметров продувки предложен универсальный коэффициент ( $F_{об}$ ), равный линейной обратной силе газового потока и установлено, что остаточное содержание [Ca] в металле определяется содержанием [Ca] и [Al] по вводу и временем выдержки металла в ковше.**

Получены эмпирические уравнения регрессии для определения площади открытой поверхности металла  $S_{б.з.} = 0,538 \cdot (F_{об}^M)^2 - 0,01 \cdot F_{об}^M + 0,083$  и для определения снижения содержания [Ca] в металле от ввода на АКП до кристаллизатора МНЛЗ при среднем времени его выдержки в ковше 25 мин.;  $\Delta[Ca] = 32,47[Ca]_{2-2}^{1,785}$  и  $\Delta[Ca] = 0,0645 \cdot (Ca/Al)^{1,71}$ .

**3. Впервые по теории МГС - фаз установлено влияние содержания углерода в металле на формирование структурно-химического состояния первичных НВ и чистоту металла. Научно обосновано и экспериментально подтверждено влияние содержания углерода при выпуске плавки на его чистоту металла по НВ.**

Балл НВ тонкой серии в толстом листе, в зависимости от содержания углерода на выпуске в диапазоне 0,05-0,09% для силикатов хрупких и крупных глобулярных определяется по уравнениям регрессии, соответственно:

$$НВ_{хр} = -0,0796 [C]_{вып} + 1,1787 \text{ и } НВ_{кр} = -0,0199 [C]_{вып}^2 + 0,0701 [C] + 0,9311.$$

**4. Впервые, в результате лабораторных высоко-температурных исследований взаимодействия металло-шлаковой системы Ca-Si-Al и CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и структурно-химического анализа по теории МГС-фаз установлено, что параметры образующихся алюминатов кальция определяются содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в модифицируемом включении и количеством введенного кальция.**

При содержании Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в НВ более 30% наблюдается стабильное восстановление алюминия кальцием, степень которого увеличивается с увеличением содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При обработке стали порошковой проволокой с силикокальцием марки СК-15 (1,3 кг/т) образуются наряду с деформируемыми и недеформируемыми алюминатами кальция; марки СК-25; СК-30 и СК-40 - преимущественно деформируемые; марки СК-50 - НВ с пониженным содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и повышенным - CaO, имеющие высокую температуру плавления и гигроскопичность.

**5. Впервые экспериментально в промышленных условиях установлено влияние системы окислов футеровка-шлак на формирование структурно-химического состояния НВ при их модифицировании высокоактивными реагентами до образования включений глобулярной формы и жидких при температуре прокатки.**

При увеличении окислов алюминия в футеровке с 2,0 до 35% расход кальция на модифицирование увеличивается в 1,2 – 1,3 раза в сравнении с применением футеровки без окислов алюминия, добавки РЗМ улучшают модифицирующее действие кальция и оптимальная их масса в высокоактивном реагенте равна 30-40 вес. %) при кислой футеровке и кислом шлаке состава кристобаллит (SiO<sub>2</sub>, осн. 0,2) расход кальция на модифицирование НВ снижается на - 25-30%.

**6. Впервые, на основании математического моделирования циркуляционных потоков металла в ступенчатом промежуточном ковше с центральной подачей струи оптимизированы режимы разливки применительно к исключению затягивания шлака в кристаллизаторы и улучшению рафинирования металла от твердых алюминатов кальция. под воздействием гидродинамических и барботажных процессов.**

В ступенчатом промежуточном ковше без перегородок с центральной подачей струи в переходные режимы разливки для исключения затягивания шлака в кристаллизаторы глубина металла не должна быть менее 0,5 м. Наиболее интенсивное направленное движение твердых частиц алюминатов кальция ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) из нижних слоев в верхние наблюдается при совместном применении турбостопа и продувки аргоном. При этом длина восходящего пути частиц увеличивается на 15-20%, а образующиеся две вихревые зоны значительно улучшают процессы коагуляции и удаления НВ в шлак.

**7. Получили дальнейшее развитие представления о влиянии конструкции днища промежуточного ковша на процессы поточного рафинирования металла от твердых алюминатов кальция.**

Установлено, что включения размером 200-30 мкм способны покинуть циркуляционные потоки и всплыть в шлак, а менее 30 мкм – структурируются в потоках и движутся со скоростями без продувки и с продувкой аргоном, соответственно 0,40 и 0,44 м/с. Для их удаления расход аргона на продувку через пористый блок должен быть до 15 л/мин, что является достаточным для рафинирования и не приводит к оголению металла, о чем свидетельствуют малые значения критериев Ричардсона ( $Ri = 0,0002 - 0,0007$ ) и Рейнольдса ( $Re = 2 - 8$ ). В промежуточном ковше с плоским днищем и с продувкой аргоном наблюдается направленное движение потоков металла в шлаковую область. Образование трех вихревых зон способствует коагуляции и удалению НВ, увеличению резидентного времени металла в ПК, уменьшению мертвых зон, что улучшает рафинировочные процессы, о чем свидетельствуют значения критерия  $Ri$ , которые без продувки аргоном на 4-9% больше чем с продувкой.

#### **Теоретическая значимость работы.**

1. Разработана физическая модель гидродинамических процессов в сталеразливочном ковше при усреднительной продувке металла инертным газом;

2. Разработана математическая модель движения циркуляционных потоков металла в ПК МНЛЗ, которая применялась на ряде металлургических предприятий для оптимизации потоков металла с целью повышения эффективности рафинирования от НВ и обработки высокоактивными реагентами.

3. Разработана методика лабораторных исследований закономерностей высокотемпературного химического взаимодействия жидкой металло-шлаковой системы  $\text{Ca-Al-Si}$  и  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ .

4. Предложена методика исследования закономерностей изменения химического состава ковшевого и покровного шлака при обработке стали высокоактивными реагентами.

5. Доработана и реализована методика определения по теории МГС-фаз структурно-химического состояния образующихся первичных НВ, модифицированных ВАР и трансформированных в результате вторичного окисления на технологическом участке АКП – кристаллизатор МНЛЗ.

6. Разработана методика проведения опытно-промышленных плавов для проведения испытаний разработанных технологических процессов.

#### **Практическая значимость работы.**

Получено универсальное уравнение определения размеров открытой поверхности металла в сталеразливочном ковше в процессе усреднительной продувки, которая позволяет управлять ее размерами при отсутствии возможности визуального контроля и снизить вторичное окисление металла.

Разработанный сквозной ресурсо-энергосберегающий технологический процесс внепечной обработки конструкционных сталей обеспечивает повышение качества, механических и служебных свойств металла и включает следующие разработанные технологии, технологические операции и заводы их опробования: - технология снятия переокисленности металла углеродсодержащими материалами в процессе выпуска плавки (РУП "Белорусский металлургический завод"); - технология внепечной обработки конструкционной трубной стали с контролем размеров открытой поверхности металла при продувке аргоном на АКП (ОАО "МК "Алчевский металлургический комбинат"); - энерго- и ресурсо-сберегающая технология внепечной обработки стали на АКП по обеспечению заданного структурно-химического состояния НВ, технология рационального раскисления стали в процессе выпуска плавки и технология поточного рафинирования стали от НВ в процессе непрерывной разливки в ПК МНЛЗ (ПАО "МК "Азовсталь"); - технология рафинирования стали шлаковыми смесями и порошковыми проволочными модификаторами в СК (НПО "Тулачермет"); - технология разливки полуспокойной (кипящей) конструкционной стали с регулированием интенсивности кипения металла в изложнице алюминийсодержащей полосой с целью снижения головной обрезки, отсортировки по поверхностным дефектам и увеличения выхода годного (ОАО "Макеевский металлургический комбинат", ОАО «Запорожсталь»); - новые составы порошкообразных материалов, содержащие высоко активные элементы для рафинирования чугунов и сталей (ремонтно-механические заводы Министерства топлива и энергетики).

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

Для решения поставленных задач исследования, с получением обладающих новизной результатов, использован следующий комплекс базовых методов теоретического и экспериментального исследования:

- термодинамические расчеты и структурно-химический анализ состава первичных НВ при снижении содержания углерода в металле на повалке;
- физическое моделирование гидродинамических процессов в сталеразливочном ковше при усреднительной продувке металла инертным газом;
- высокотемпературные лабораторные исследования взаимодействия металл-шлаковой системы  $Al - Si - Ca$  и  $Al_2O_3 - SiO_2 - CaO$ ;
- металлографические исследования количественного состава неметаллических включений микрорентгеноспектральным методом на спектрометре энергети-



ческой дисперсии INCA PentaFETx3 при помощи автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа ULTRA 55 и рентгено-дифракционные исследования НВ на рентгеновском дифрактометре D/MAXX 2200 HL/PC;

- исследования микроструктуры образцов металла с использованием оптического микроскопа NEOFON-32;

- математическое моделирование движения НВ в циркуляционных потоках металла;

- опытно-промышленные и промышленные испытания разработанных технологических процессов производства конструкционных трубных сталей с контролем технологических параметров и качества металла на предприятии в производственном потоке.

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие основные научные разработки и положения:

1. Методология проектирования сквозного технологического процесса внепечной обработки конструкционных сталей на основе управления процессами образования, модифицирования и трансформации НВ, и их поэтапного удаления.

2. Методология управления размерами, образующейся открытой от шлака поверхности в сталеразливочном ковше на АКП в зависимости от технологических параметров усреднительной продувки металла аргоном.

3. Методология управления структурно-химическим состоянием первичных НВ, образующихся при раскислении стали в процессе выпуска плавки, модифицированных в процессе обработки стали высокоактивными реагентами и после трансформации в результате вторичного окисления АКП-МНЛЗ.

4. Зависимость влияния структурно-химического состояния ковшевого и покровного шлаков при обработке стали высокоактивными реагентами и химического состава футеровки (хромомагнезит, шамот и муллит) на структурно-химическое состояние остаточных НВ.

5. Влияние состава алюминатов кальция, образующихся при внепечной обработке стали кальцийсодержащими реагентами и их способности к гидратации и гидрогенизации на механические и служебные свойства стали.

6. Методология разработки технологии поточного удаления неметаллических включений в промежуточном ковше МНЛЗ в процессе непрерывной разливки под воздействием гидродинамических и барботажных процессов.

**Степень достоверности и апробация результатов диссертации.** Достоверность и новизна научно-технических решений работы, обоснованность выводов и рекомендаций подтверждаются корректным применением результатов разработанной научной теории рафинирования конструкционных сталей в процессе внепечной обработки на основе анализа и управления структурно-химическим состоянием неметаллических включений; выполненных теоретических исследований, математического моделирования, лабораторных экспериментов для разработки технологии; их адекватностью с результатами промышленных экспериментов, сопоставимостью результатов экспериментальных исследований с теоретическими выводами, технико-экономической эффективностью результатов промышленных испытаний разработанного сквозного технологического процесса.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и национальных конференциях, конгрессах и форумах, в частности на: VI Международной конференции «Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах» посвящ. 70-летию Приазовского государственного технического университета (Мариуполь, 7-9 сентября 2000 г.), IX Конгрессе сталеплавателей (Старый Оскол-Москва – 2006 г.), 6-ом Международном Форуме по тепломассообмену (г. Минск 19-23 мая 2008 г.), XV и XVI Международных научно-технических конференциях "Машиностроение и техносфера XXI века" (г. Севастополь, сентябрь 2008 и 2009 г.г.), научно-технической конференции "50-лет непрерывной разливки в Украине" (г. Донецк-2010), научно-технической конференции "Инновационные способы внепечной обработки чугуна и стали" (г. Донецк, 25-26 октября 2011г.), XI Международном Конгрессе сталеплавателей (г. Нижний Тагил, 3-8 октября 2010г.), XII-ом Международном Конгрессе сталеплавателей (г. Москва-Выкса, 21-26 октября 2012 г.), Межд. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы физико-химического материаловедения» (Макеевка, 30 сентября – 4 октября 2013 г.),

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ**

**В первом разделе** "Теоретические основы и современное состояние технологии внепечной обработки конструкционных сталей" выполнен критический анализ литературных данных современного состояния теоретических основ и технологических процессов внепечной обработки стали.

С заменой установок доводки металла на АКП первостепенное значение для обеспечения заданного качества металла имеет технологический участок АКП-МНЛЗ. Результаты последних исследований свидетельствуют, что остаточное содержание, размер и структурно-химическое состояние НВ существенно влияют на качество, а, следовательно, механические и служебные свойства конструкционных сталей. Однако протекающие физико-химические, термодинамические, теплофизические и гидродинамические процессы, существенно влияющие на модифицирование НВ и их дальнейшую трансформацию, исследованы не достаточно глубоко, что не позволяет в полной мере использовать положительное влияние высокоактивных реагентов и снизить негативное влияние вторичного окисления на качество металла. Анализ существующих технологий внепечной обработки стали на агрегате ковш-печь свидетельствует, что на их эффективность значительное влияние оказывают такие технологические параметры, как содержание углерода и температура металла на выпуске, состав ковшевого и покровного шлаков, размеры открытой поверхности металла при продувке аргоном, содержание кальция и алюминия в обрабатываемой стали, время выдержки металла в ковше от АКП до МНЛЗ и т.д.

Развитие научных основ и технологии внепечной обработки конструкционных сталей с учетом вышеперечисленных неучтенных особенностей и совершенствование на их базе технологического процесса позволяет оперативно и без значительных материальных затрат повысить не только эффективность существующих, но и разработать более прогрессивные технологии внепечной обработки, обеспечи-

вающие значительное повышение качества и снижение отсортировки проката.

**Во втором разделе** "Методика проведения исследований" представлены методики проведения исследований: физическое моделирование гидродинамических процессов в сталеразливочном ковше при продувке металла аргоном; высокотемпературные лабораторные исследования металло-шлаковой системы Ca-Si-Al и CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; промышленные исследования изменения ковшевого и покровного шлака, особенности обработки конструкционной стали порошковой проволокой с силикокальцием и алюминием в ковшах с различной футеровкой, анализ структурно-химического состояния по теории МГС-фаз первичных, модифицированных и после трансформации НВ. Определение количественного состава НВ в стали микро-рентгеноспектральным методом на спектрометре энергетической дисперсии IN-CA PentaFETx3 при помощи автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа ULTRA 55. Рентгено-дифракционные исследования НВ на рентгеновском дифрактометре D/MAXX 2200 HL/PC. Исследования микроструктуры образцов металла выполнены на оптическом микроскопе NEOFON-32.

**В третьем разделе** "Образование первичных неметаллических включений в конструкционных сталях" на основании результатов термодинамических расчетов, выполненных с применением экспериментально полученных констант равновесия и анализа по теории МГС-фаз, разработана методика и проведены исследования по определению структурно-химического состояния образующихся первичных НВ в сталеразливочном ковше (350 тонн) в процессе выпуска металла с температурой 1650°С и при различных вариантах присадки ферросплавов.

При равновесном содержании кислорода и углерода в стали и при ее раскислении марганцем химический состав образующихся первичных НВ определяется содержанием углерода в пробе металла, отобранной после повалки (пп):

$$[C]_{пп} = 0,12\% \quad (31 \text{ FeO} + 69 \text{ MnO})_{тв}; \quad (1)$$

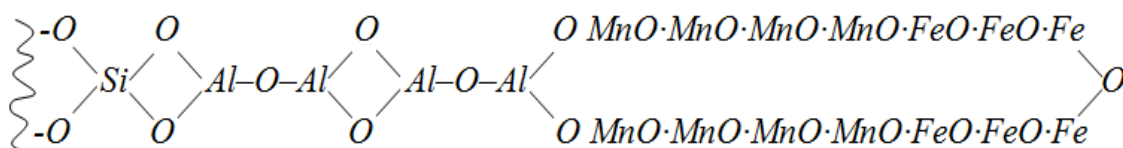
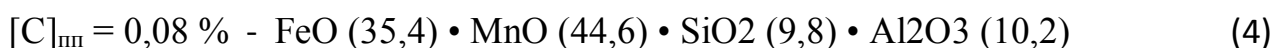
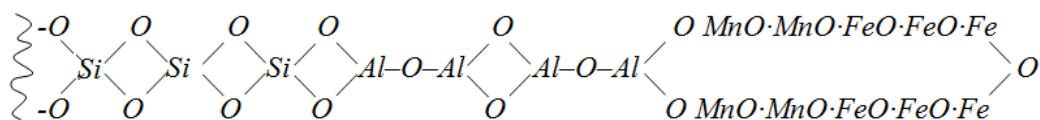
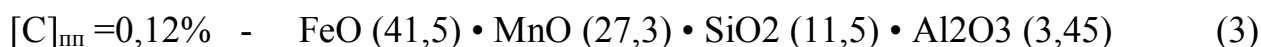
$$[C]_{пп} = 0,08 \text{ \%} \quad (18 \text{ FeO} + 82 \text{ MnO})_{тв}. \quad (2)$$

В первую очередь, согласно диаграммы состояния FeO-MnO и количества присаживаемого марганца для получения его содержания 1,40-1,60%, наблюдается протекание моновариантных равновесий, когда образуются НВ переменного состава ( $m\text{FeO} + n\text{MnO}$ ), которые при содержании углерода 0,12-0,08% - преимущественно жидкие, а при менее 0,08% - преимущественно твердые.

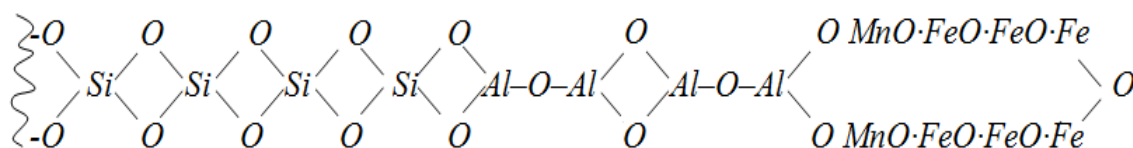
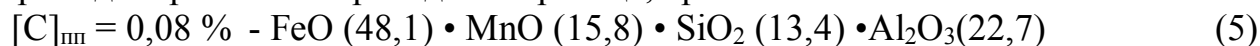
При последующей присадке кремния основную часть равновесных НВ составляют сложные силикатные включения преимущественно твердой фазы переменного состава ( $m\text{FeO} + k\text{SiO}_2 + n\text{MnO}$ ), в меньшем количестве - силикатные (стекло и  $\beta$  - кристобалит) и оксидные включения в виде жидкой фазы. Присадка алюминия приводит к образованию сложных силикато-алюминатных включений, преимущественно твердой фазы переменного состава ( $m\text{FeO} + f\text{Al}_2\text{O}_3 + k\text{SiO}_2 + n\text{MnO}$ ), в которых алюминий присутствует в виде алюмината железа ( $(\text{FeAl}_2\text{O}_4)_{тв}$ ) и/или корунда ( $(\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3)_{тв}$ ), а также возможно существование соединений переменного состава ( $m\text{FeO} + f\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в виде жидкой фазы. Образующиеся первичные НВ, в зависимости от содержания углерода и последовательности присадки ферросплавов, при темпе-

ратуре металла на выпуске 1650° С, имеют следующий химический состав (%) и соответствующий ему СИМ-комплекс:

При последовательной присадке марганца, кремния и алюминия:



При одновременной присадке марганца, кремния и алюминия:



Адекватность определенного по данной методике химического состава НВ фактическому, подтверждается их соответствием среднему по спектрам химическому составу включений (таблица 1), определенному микрорентгеноспектральным методом на спектрометре энергетической дисперсии INCAPentaFETx3 при помощи автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа ULTRA 55 в стали химического состава (%): С - 0,08; Mn - 0,42; Si - 0,09 : Al - сл.

Таблица 1. Химический состав НВ, полученный микрорентгеноспектральным методом на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе ULTRA 55 (средние значения)

Количество исследуемых спектров	Среднее содержание основных окислов в НВ, %		
	FeO	SiO <sub>2</sub>	MnO
7	9,54	42,32	47,64
5	14,49	37,84	34,75
6	15,88	39,47	38,19

В промышленных условиях в сталеразливочном ковше в процессе выпуска плавки в результате переокисленности металла от интенсивного взаимодействия па-

дающей струи с кислородом воздуха раскисление протекает в условиях неравновесного к углероду, повышенного содержания кислорода, что приводит к образованию НВ со значительным содержанием FeO, преимущественно жидкой фазы.

Для снятия переокисленности металла без его науглероживания проведены промышленные исследования и разработаны технологии предварительного раскисления стали мелкокусковым углеродсодержащим материалом, присаживаемым в сталеразливочный ковш при выпуске плавки перед присадкой ферросплавов и порошкообразным материалом, обдуваемым струю металла при выпуске плавки. По опытно-промышленным плавкам определены зависимости расхода углеродсодержащего материала и чистого углерода для снятия переокисленности металла от содержания углерода в стали с высокой сходимостью ( $R^2 = 0,97$ ).

**В четвертом разделе "Исследования гидродинамических поверхностных процессов в сталеразливочном ковше при продувке металла инертным газом"** представлены результаты физического моделирования, свидетельствующие, что при высокой интенсивности продувки на поверхности моделирующей жидкости образуются три характерные зоны локального повышения уровня: барботажная, встречных волн и всплесков, которые изменяют свои геометрические размеры или полностью исчезают при изменении технологических параметрах продувки (рисунки 1).

Для определения площади барботажной зоны выведен универсальный коэффициент и получено эмпирическое уравнение регрессии, которое имеет вид:

$$S_{б.з.} = 0,538 \cdot (F_{об}^M)^2 - 0,01 \cdot F_{об}^M + 0,083, \quad (6)$$

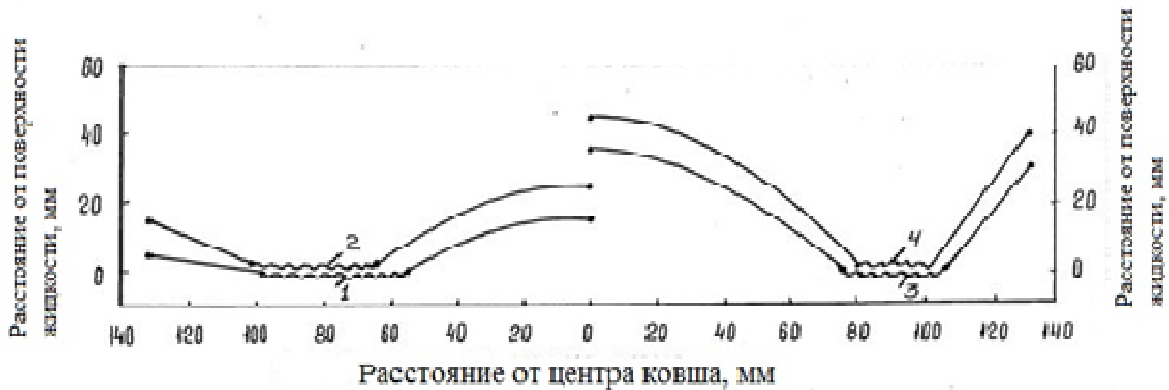
где  $F_{об}^M$  - это универсальный коэффициент, который равен линейной обратной силе газового потока и позволяет определить площадь барботажной зоны для различных конструкций продувочных устройств, глубине обрабатываемого металла и режимов продувки:

$$F_{об}^M = \frac{H_M \cdot 10^{-3}}{S_c \cdot P_2}, \text{ м/Н}, \quad (7)$$

где  $H_M$  - глубина обрабатываемого металла (расстояние от сопла продувочного устройства до поверхности металла), м;  $S_c$  - общая площадь сопел продувочного устройства, м<sup>2</sup>;  $P_2$  - давление газа перед соплом, Н/м<sup>2</sup>.

Линейная обратная сила – это сила, с которой жидкость давит на всплывающие газовые пузыри, сила - которую необходимо преодолеть газовым пузырям при всплывании в металле на единицу длины при продувке аргоном.

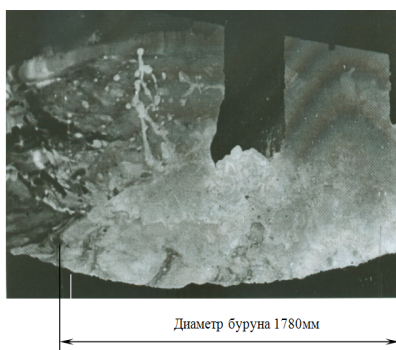
Адекватность разработанной методики и результатов исследований, определенных по ней размеров открытой поверхности металла при продувке аргоном в сталеразливочных ковшах емкостью 100, 250 и 300 тонн, подтверждается их



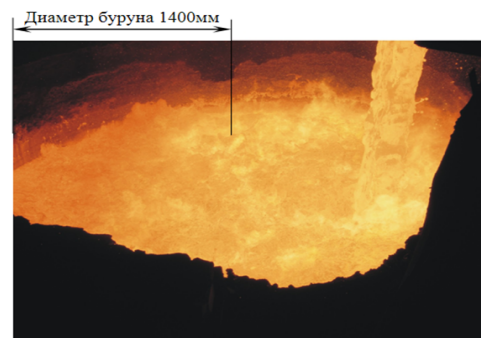
Интенсивность газа на продувку:

1 – 0,000139 м<sup>3</sup>/с (0,3 м<sup>3</sup>/ч); 2 – 0,000278 (1,0); 3 – 0,000417 (1,5); 4 – 0,000555 (2,0)

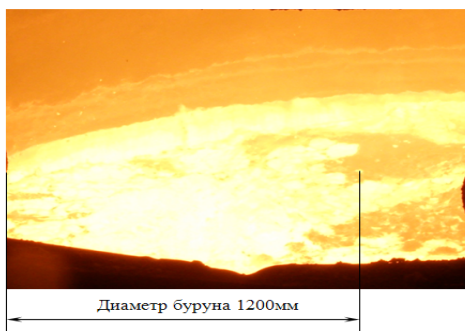
Рисунок 1. Схематическое изображение наиболее наглядного локального повышения уровня жидкости при вдувании газа через аварийный продувочный узел или при повышении давления для его промывания



а)



б)



в)



г)

Обозначения: а) – 100-тонный СК РУП "Белорусский металлургический завод"; б), г) – 250-тонный СК ОАО "Запорожсталь"; в) – 300-тонный СК ОАО "Алчевский металлургический комбинат"

Рисунок 2. Характерный вид барботажной зоны (открытой поверхности металла) в сталеразливочном ковше при различных технологических параметрах продувки металла аргоном

соответствием фактическим размерам, определенным в промышленных условиях при одинаковых режимах усреднительной продувки методом фотосъемки (рисунок 2). Максимальное отклонение расчетного диаметра открытой поверхности металла от фактического составляет  $\pm 0,1$  м, что соответствует ошибке 5-7% и вполне приемлемо для точности оценки гидродинамических нелинейных волновых процессов.

**В пятом разделе "Модифицирование неметаллических включений высокоактивными реагентами и влияние ковшевого и покровного шлака на их структурно-химическое состояние»** представлены результаты лабораторных высокотемпературных исследований взаимодействия металло-шлаковой системы Ca-Si-Al и CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> применительно к модифицированию НВ силикокальцием и алюминием (рисунок 3).

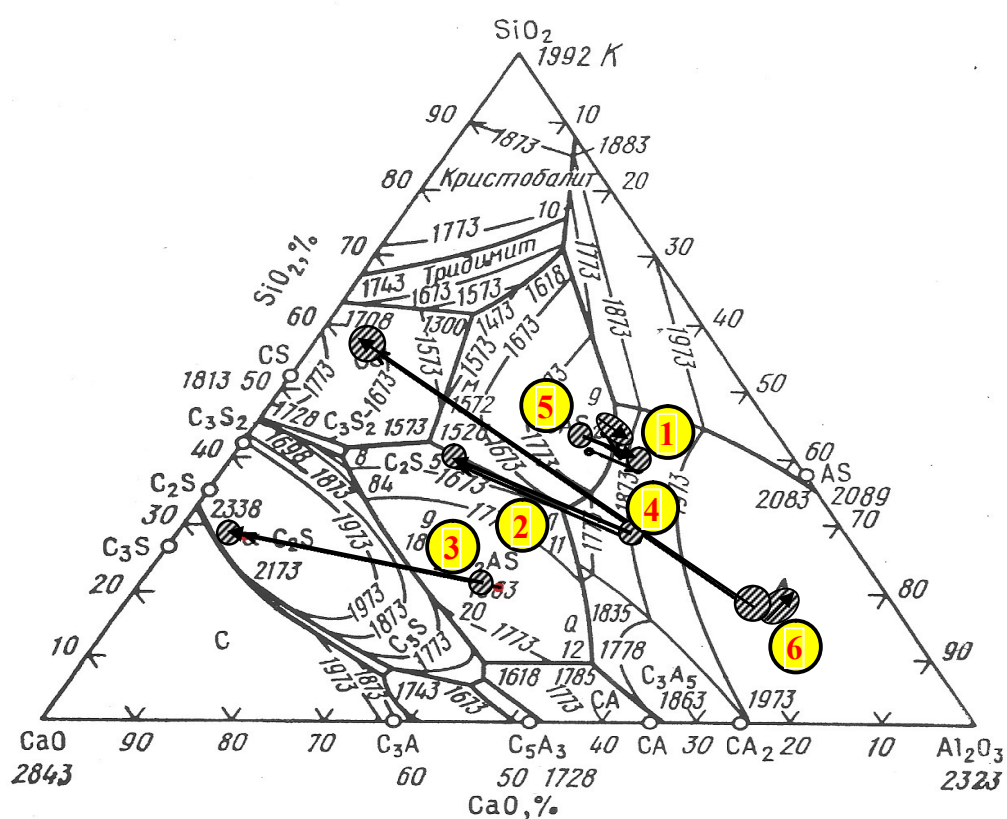


Рисунок 3. Диаграмма изменения химического составов шлаковой фазы CaO- SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при ее взаимодействии с металлической фазой Ca-Al-Si химического состава, %: 1) – 29-20-50; 2) – 42-28-30; 3) – 49-17-34; 4) – 25-37-38; 5) – 18-40-42; 6) – 18-40-42

При взаимодействии металлической и шлаковой составляющих доминирующей реакцией является восстановление алюминия кальцием из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, что приводит к обогащению шлаковой фазы оксидами кальция и приросту алюминия в металлической фазе. Добавки в силикокальций металлического кальция значительно повышают эффективность восстановления алюминия, так его прирост в металлической составляющей увеличивается с 3,0 до 7,0 % при увеличении содержания оксидов



алюминия с 30 до 70%; в сравнении, соответственно, с 0,8 до 3,3% и при - с 40 до 60%, при одном силикокальцие.

Установлено, что при обработке стали силикокальцием марки СК-15 (сплав) и взаимодействии образующейся металлической фазы ( $17,83\text{Ca} + 40,07\text{Al} + 42,1\text{Si}$ ) с НВ составов анортит ( $20,1\text{CaO} + 36,7\text{Al}_2\text{O}_3 + 43,2\text{SiO}_2$ ) и глинозит ( $17,5\text{CaO} + 63,8\text{Al}_2\text{O}_3 + 18,7\text{SiO}_2$ ) образуются преимущественно недеформируемые НВ состава корунд, соответственно ( $18\text{CaO} + 42\text{Al}_2\text{O}_3 + 40\text{SiO}_2$ ) и ( $15\text{CaO} + 64\text{Al}_2\text{O}_3 + 21\text{SiO}_2$ ).

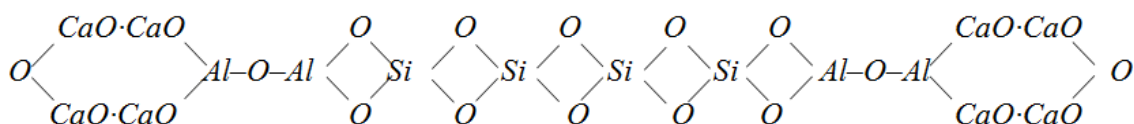
При обработке стали силикокальцием марки СК-25 (сплав) и алюминием взаимодействие образующихся локальных объемов высокоактивных реагентов состава  $25,89\text{Ca} + 36,51\text{Al} + 37,05\text{Si}$  с НВ состава глинозит ( $17,5\text{CaO} + 63,8\text{Al}_2\text{O}_3 + 18,7\text{SiO}_2$ ) приводит к образованию преимущественно деформируемых НВ состава псевдоволластонит ( $37\text{CaO} + 6\text{Al}_2\text{O}_3 + 57\text{SiO}_2$ ).

При обработке стали силикокальцием марки СК-30 (сплав) и алюминием взаимодействие высокоактивных реагентов состава  $29,2\text{Ca} + 20,2\text{Al} + 50,6\text{Si}$  с НВ состава анортит ( $20,1\text{CaO} + 36,7\text{Al}_2\text{O}_3 + 43,2\text{SiO}_2$ ) наблюдается незначительное изменение их химического состава без изменения структурного с образованием деформируемых НВ среднего состава  $20\text{CaO} + 39\text{Al}_2\text{O}_3 + 41\text{SiO}_2$ .

При модифицировании НВ силикокальцием с более высоким содержанием кальция (СК-25; СК-30 и СК-40) наблюдается более существенное восстановление алюминия из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и образование преимущественно деформируемых НВ, имеющих температуру плавления ниже температуры кристаллизации стали.

При модифицировании НВ силикокальцием с высоким содержанием кальция (СК-50) наблюдается образование НВ преимущественно с пониженным содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и повышенным –  $\text{CaO}$ , имеющих высокую температуру плавления и высокую гигроскопичность.

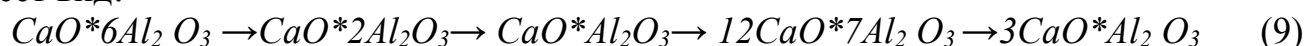
Процесс модифицирования НВ заключается в изменении их структурно-химического состояния в зависимости от их химического состава и количества введенного модификатора. В результате анализа, выполненного по теории МГС-фаз, определены структурно-химическое состояние модифицированных НВ, которые образуются при обработке стали силикокальцием. Ниже представлен пример структурной формулы и СИМ-комплекса при модифицировании НВ состава геленит ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) силикокальцием:



В сталях с низким содержанием серы и, следовательно, с низким содержанием сульфидных НВ, модифицирование НВ кальцием заключается в преобразовании глиноземных включений в алюминаты кальция. При нормальных условиях пребывания алюминаты кальция ( $m\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$ ) - это бесцветные кристаллы, взаимодействующие с водой, реакционная способность которых по отношению к воде воз-



растает при увеличении отношения  $m/n$ , а ряд повышения реакционной способности имеет вид:



Результаты расчетов, выполненные по теории МГС-фаз, свидетельствуют, что адсорбция водно-водородных газов алюминатами кальция, находящимися в жидкой стали, зависит от структурно-химического состояния неметаллических включений, которое определяется параметрами химической связи (энергия, длина), рассчитанными по квантово-механическим характеристикам атомов. Расчетные гидратная ( $H_2$ ) и гигроскопичная емкости ( $H_2O$ ) алюминатов кальция, находящихся в виде НВ в жидкой стали, химических составов  $CaO \cdot 6Al_2O_3$ ;  $CaO \cdot 2Al_2O_3$  и  $CaO \cdot Al_2O_3$  при отношении в них  $Ca/Al$ , равной, соответственно, 0,18; 0,37 и 0,74 имеют значения, соответственно: 5,9; 14,0; 21,0 и 10,0; 22,2; 32,0%.

Установлено, что обработка стали кальцийсодержащими реагентами в сталеразливочном ковше приводит к повышению содержания в шлаке  $CaO$  и снижению  $FeO$ , соответственно, на 0,5 – 3,0 и 0,5 - 0,7%. В зависимости от огнеупорного материала футеровки и технологии внепечной обработки стали в сталеразливочном ковше формируется ковшевой шлак следующего состава:

- при хромомagneзитовой футеровке – псевдодоластонит ( $43,83CaO + 8,97Al_2O_3 + 47,20SiO_2$ ), шамотной – ранкинит ( $66,4CaO + 7,37Al_2O_3 + 26,23SiO_2$ ), муллитовой – геленит ( $54,94CaO + 26,27Al_2O_3 + 18,79SiO_2$ );

- при периклазо-алюмо-углеродистой футеровке – геленит ( $60,19CaO + 25,91Al_2O_3 + 13,90SiO_2$ ).

Для рафинирования стали на АКП, как правило, формируют шлак с достаточно высоким содержанием  $CaO$ , порядка 45-66%. При усреднительной продувке аргоном прилегающие слои металла химически взаимодействуют со шлаком, в результате чего протекают процессы поглощая расплавом атомарного и молекулярного кислорода, окисления высокоактивных элементов ( $Ca-Al-Si$ ) и НВ, растворенных в стали, окислами шлака. Это может приводить к трансформации НВ в твердые недеформируемые при температуре прокатки, с высоким содержанием  $Al_2O_3$  или  $CaO$  и значительно ухудшающие как механические так и коррозионные свойства металла.

В процессе разлива серии плавов на МНЛЗ в промежуточном ковше от плавки к плавке изменяется структурно-химическое состояние покровного шлака, в частности, на плавках без ввода силикокальция наблюдается переход структурно-химического состояния шлака из анортита ( $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) в менее эффективное рафинировочное состояние муллит ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) с небольшим содержанием  $CaO$ . На плавках с обработкой стали силикокальцием наблюдается облагораживание покровного шлака и преобразование его структурно-химического состояния из анортита ( $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) в более эффективное рафинировочное состояние геленит ( $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ).

Экспериментально в промышленных условиях установлены химические составы образующихся НВ и их агрегатное состояние в зависимости от состава и расхода высокоактивных реагентов, структурно-химического состояния покровного шлака и состава футеровки.

В сталеразливочном ковше с хромомагнетитовой футеровкой, в частности при ковшем шлаке состава ранкинит ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ , осн. 2,0) без обработки ВАР образуются твердые окислы  $\text{Mn}, \text{Si}, \text{Al}, \text{S}$ . При ковшем шлаке состава псевдо-волластонит ( $\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$ , осн. 2,0) и обработке стали СК30РЗМ30(50+50) с расходом  $\text{Ca} - 0,36$  и РЗМ -1,2 кг/т, а также при обработке СК30+Al(71+29) с расходом  $\text{Ca} - 0,72$  и Al - 1,02 кг/т образуются жидкие НВ в виде окислов  $\text{Ca}, \text{Si}, \text{Al}, \text{S}, \text{Mn}$ .

В ковшах с шамотной футеровкой и покровном шлаке состава ранкинит (осн. 3.9) при обработке СК30РЗМ30(50+50) с расходом  $\text{Ca} - 0,29$  и РЗМ - 0,95 кг/т - твердые НВ в виде окислов  $\text{Ca}, \text{Si}, \text{Al}, \text{S}, \text{Mn}$ .

В ковшах с кварцевой футеровкой и покровном шлаке состава кристобаллит ( $\text{SiO}_2$ , осн. 0,2) без обработки и с обработкой СК20 с расходом  $\text{Ca} - 0,25$  кг/т образуются, соответственно, твердые НВ в виде силикатов различной формы и жидкие - в виде окислов глобулярной формы.

Установлено, что увеличение содержания окислов алюминия в футеровке затрудняет перевод НВ в жидкое состояние и увеличивает расход кальция на модифицирование, применение РЗМ улучшает модифицирование НВ, при кислой футеровке и кислом шлаке расход кальция на модифицирование НВ снижается. При внепечной обработке высокоактивными реагентами как основных так и кислых сталей необходимо применять футеровку, не содержащую окислов алюминия, а основность шлака в зависимости от задач рафинирования поддерживать более 2,0 ед.

**В шестом разделе "Трансформация неметаллических включений в стали на технологическом участке АКП-МНЛЗ"**, согласно оценке неметаллических включений по стандарту ASTM E 45-97 установлено, что в конструкционной трубной стали категории прочности X70, основными включениями, определяющими качество металла, являются силикаты хрупкие, которые под действием пластической деформации разрушаются, и крупные - глобулярные недеформируемые в процессе пластической деформации. Неметаллические включения в виде сульфидов и силикатов пластических в стали отсутствуют.

Установлено, что при обработке стали кальцием, при приросте его содержания с 0,0005% до 0,0060 % средний балл тонкой серии хрупких силикатов снижается на 0,1 ед. (с 1,12 до 1,02 ед.), а силикатов недеформированных (глобулярных) - увеличивается на 0,05 ед. (с 0,90 до 0,95 ед.), что свидетельствует о глобуляризации хрупких силикатов, переводе их в недеформируемые (глобулярные) и о частичном их удалении в шлак.

Снижение содержания кальция на технологическом участке АКП-МНЛЗ сопровождается удалением крупных НВ. В частности, снижении кальция с 0,0005 % до 0,0050% приводит к уменьшению среднего балла тонкой серии силикатов; крупных недеформируемых глобулярных - на 0,15 ед., а хрупких - приводит к незначительному приросту - примерно на 0,04 ед.

Снижение содержания алюминия приводит к увеличению количества недеформируемых НВ. При снижении алюминия в стали с 0,001 до 0,014 % средний балл хрупких силикатов остается неизменным, а крупных недеформированных - снижается на 0,05 ед.

Эффективность положительного влияния отношения  $Ca/Al$  на НВ как в виде хрупких так и крупных недеформированных (глобулярных) силикатов в значительной степени определяется содержанием углерода в металле после повалки. Результаты исследований свидетельствуют о том, что при снижении содержания углерода в металле после повалки с 0,07 до 0,03 % отношения  $Ca/Al$  неоднозначно влияют на содержание НВ в стали.

При низком содержании углерода на повалке, равном 0,03-0,04 %, и при увеличении отношения  $Ca/Al$  наблюдается повышение балла НВ. Для его снижения необходимо обеспечить  $Ca/Al$  на нижнем уровне, порядка, 0,05 ед., т.е. при этом следует понизить содержание кальция в металле и повысить содержание алюминия, приблизив его к верхнему пределу по химическому составу. Эта необходимость объясняется тем, что при снижении содержания углерода в металле после повалки количество кислорода увеличивается и, следовательно, для его удаления необходимо значительно большее количество алюминия, а образующиеся при этом твердые алюминаты хорошо удаляются из металла.

При содержании углерода после повалки 0,05 – 0,06% отношения  $Ca/Al$  в меньшей степени влияют на количество образующихся НВ, которое находится примерно на одном уровне, и  $Ca/Al$  следует поддерживать в диапазоне 0,09-0,11 ед.

При содержании углерода 0,07 % и более отношения  $Ca/Al$  целесообразно увеличить до 0,15, при этом наблюдается снижение балла НВ в стали. Отношение  $Ca/Al$  более 0,10 позволяет обеспечить минимальный балл НВ. Это объясняется тем, что при более высоком содержании углерода в металле образуются в большей степени жидкие НВ для глобуляризации и при удалении которых необходимо затратить большее количество кальция.

**В седьмом разделе "Исследования поточного рафинирования неметаллических включений в процессе непрерывной разливки"** представлены результаты исследований гидродинамических и барботажных процессов и их влияние на поточное рафинирование стали от НВ.

Исследования циркуляционных потоков расплава и движение в нем НВ под действием гидродинамических и барботажных процессов проводили методом математического моделирования, в основу которого положены уравнения Навье-Стокса и неразрывности, описывающие процесс в ламинарной и турбулентной формах движения и имеющие следующий критериальный вид в форме Гельмгольца:

$$\frac{\partial \omega}{\partial Fo} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} = \text{Pr} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right); \quad (10)$$

$$\omega = -\Delta \psi,$$

где  $\omega$  – вихрь вектора скорости (определяется вектором угловой скорости);  $\psi$  – линия (функция) тока (в каждой точке в данный момент времени вектор скорости направлен по касательной к ней) связана с компонентами скорости:

$$V_1 = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad V_2 = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (11)$$

где  $Fo$  и  $Pr$  – критерии подобия, соответственно, критерий гомохронности  $Fo = at/x_0^2$  и критерий Прандтля  $Pr = \nu/a$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $t$  – текущее время;  $x_0$  – характерный размер (ширина центральной секции);  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости.

Начальными условиями смены сталеразливочного ковша приняты параметры работы системы промковш-стальковш в стационарном режиме:

$$\omega = f(x, y, t); \psi = f(x, y, t) \quad (12)$$

Граничные условия для компонент скорости формируются из соображений, что на всех стенках (перегородки, дно) выполняются условия прилипания и непроницаемости. Характерные гидродинамические картины и скорости движения потоков расплава, имеющие место в вертикальной плоскости по продольной оси ПК, в начале разливки первой плавки в серии после открытия стопоров подачи металла в кристаллизаторы через 30 сек., 2 мин. и 4 мин. 20 сек., представлены на рисунке 4. Математическая модель и вычислительный алгоритм реализовывались с помощью конечно разностных схем и методов разности против потока, возмущенного оператора и прогонки, в среде Delphi.

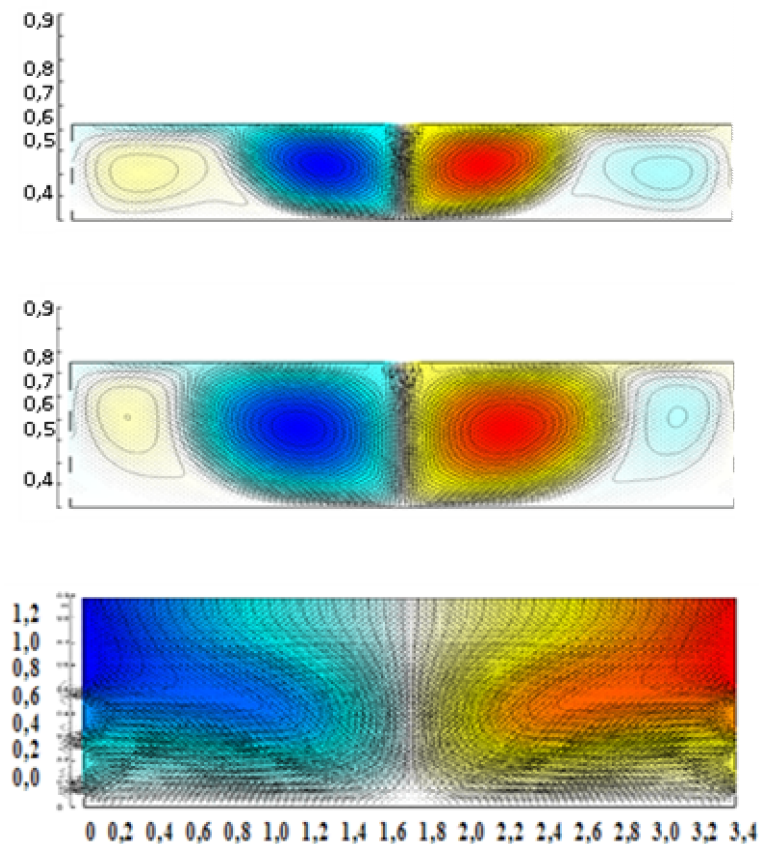
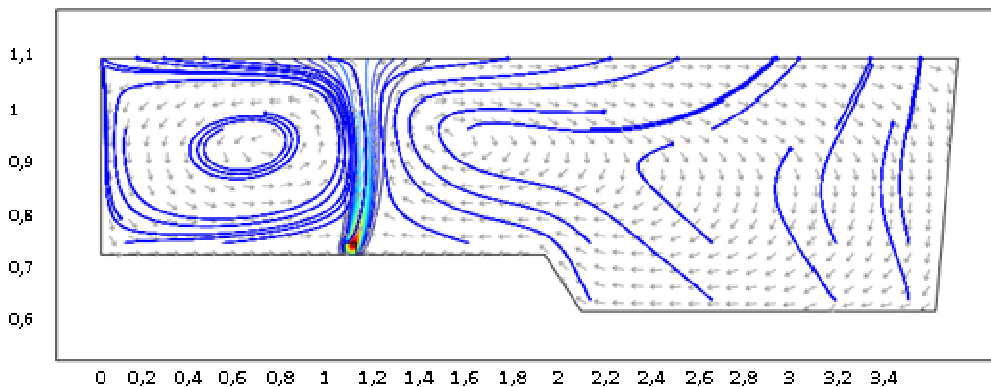
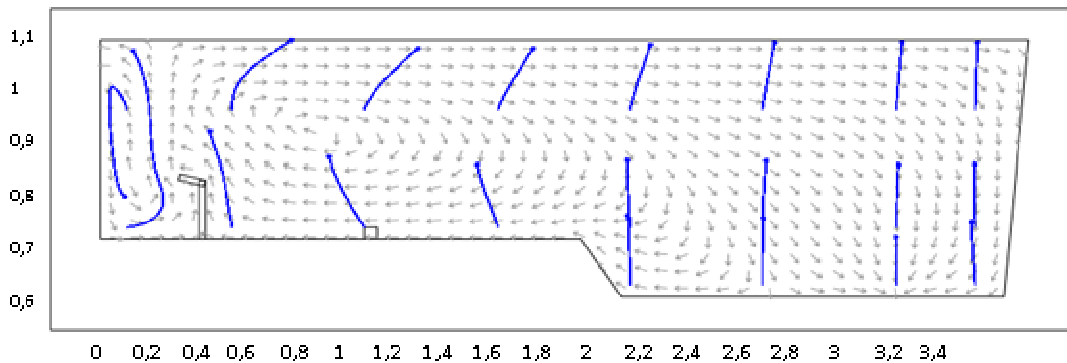


Рисунок 4. Интенсивность циркуляционных потоков при повышении уровня металла в промежуточном ковше при открытии шиберов сталеразливочного ковша: а) – через 30 сек., б) – 2 мин., в) – 4 мин. 20 сек.

В разливочную секцию металл поступает со скоростью  $0,8 \div 1,0$  м/с. В горизонтальном направлении потоки металла движутся навстречу друг другу от перегородки и торцевой стенки к оси сталеразливочного стакана. Горизонтальная скорость движения на уровне верхнего, среднего и нижнего проточных каналов значительно различается и на 12-й минуте разливки составляет соответственно  $\pm 0,2 \div 0,3$ ;  $\pm 0,4 \div 0,5$  и  $\pm 0,8 \div 0,9$  м/с.

В вертикальном направлении потоки металла у перегородки и торцевой стенки разливочной секции движутся вверх, а над разливочным стаканом – вниз. Движение потоков расплава на горизонте верхнего канала в верхнем направлении не наблюдается, а в нижнем направлении имеет скорость  $0,2 \div 0,3$  м/с. Скорость движения потоков металла на 12-й минуте разливки на горизонте среднего и нижнего каналов в верхнем направлении соответствует  $0,7$  и  $0,9$  м/с, а в нижнем –  $1,1 \div 1,2$  м/с.

а)



б)

Рисунок 5. Трассировка ЧАК диаметром 200 мкм в течении 5 сек в ПК, соответственно: а) - с турбостопом, б) - с продувкой аргоном

При исследовании движения НВ направление и длину их пути определяли вычислительным экспериментом применительно к движению частицы алюмината

кальция ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) диаметром 50, 100 и 200 мкм за 5 и 20 сек. в промежуточном ковше без перегородок, с установленным «турбостопом» и/или с продувкой аргоном через пористую вставку (рисунок 5).

Частица алюмината кальция (ЧАК) движется под действием циркуляционных потоков приблизительно с их скоростью, но со значительным отклонением направления движения в верхние слои расплава. Длина ее пути и скорость движения увеличивается с увеличением диаметра частицы. При этом, вертикальная компонента скорости увеличивается более значительно чем горизонтальная. Увеличение вертикальной компоненты скорости при увеличении диаметра частицы с 50 до 200 мкм составляет, соответственно в ПК:

- без перегородок – 28-30%;
- с продувкой аргоном - в 2-3 раза над продувочной вставкой, а в остальном объеме – на 30-35%;
- с продувкой аргоном и «турбостопом» - в 2-3 раза над продувочной вставкой, а в остальном объеме – на 8-10%.

Наличие барботажа существенно меняет траекторию движения частиц, направляя их в шлаковую область и вовлекая все большие объемы металла. За счет образования восходящих потоков при всплывании газовых пузырей, практически по всему остальному объему металла в промежуточном ковше формируется более интенсивное направленное движение НВ из нижних слоев в верхние и шлаковую область.

Поскольку скорость всплывания НВ диаметром 100 мкм составит 0,00327 м/с, что намного меньше скорости всплывания пузырьков, относительную скорость всплывания включения и пузырька можно считать равной скорости всплывания пузырька.

**В восьмом разделе** "Совершенствование технологии внепечной обработки конструкционных сталей" представлены результаты исследований по разработке и совершенствованию технологии внепечной обработки конструкционных сталей:

- при выпуске плавки:
- технология снятия переокисленности и предварительного раскисления металла присадкой мелкокускового углеродсодержащего материала в начале выпуска плавки;
- технология защиты металла от окисления при выпуске плавки путем обдува струи порошкообразным углеродсодержащим материалом.

Результаты промышленных плавов, проведенные с применением технологии снятия переокисленности, свидетельствуют об увеличении степени усвоения из ферросплавов марганца (на 5-6%) и кремния (с 73,0 % до 75,8 %), а также о повышении чистоты стали по неметаллическим включениям и механических свойств готового металла.

На АКП: - усовершенствована технология обработки стали порошковой проволокой с кальцийсодержащим реагентом, обеспечивающая получение максимальной степени его усвоения по вводу и повышающее его положительное действие по десульфурации стали;

- разработана технология усреднительной продувки металла инертным газом в сталеразливочном ковше на АКП с контролем открытой поверхности металла, что позволяет исключить вторичное окисление металла;

- разработана технология подконтрольного снижения кальция в стали от окончания обработки стали на АКП до разливки на МНЛЗ, позволяющая обеспечить заданное остаточное содержание НВ, а, следовательно, и качество металла. В результате выполненных исследований установлено, что в период от окончания обработки стали на АКП (проба 2-2) до ее разливки на МНЛЗ (проба 3-2) содержание кальция значительно снижается, а закономерность описывается уравнением:

$$\Delta[Ca] = 32,47 \cdot [Ca]_{2-2}^{1,785} \quad (13)$$

Снижение содержания кальция и алюминия в стали – это взаимосвязанные процессы. Зависимость снижения содержания кальция в стали в период от окончания обработки на АКП до разливки на МНЛЗ от отношения содержания Ca/Al описывается уравнением:

$$\Delta [Ca] = 0,0645 (Ca/Al)^{1,7067}$$

Для обеспечения в стали низкого содержания водорода (менее 1,5 ppm) применяется обработка стали в ковшевом вакууматоре.

Разработанная технология поточного рафинирования стали в ПК МНЛЗ включает технологические операции:

- формирование рациональной гидродинамической структуры и скорости движения циркуляционных потоков металла для создания условий максимального удаления НВ размером более 30 мм восходящими потоками в шлак;

- формирование рациональной гидродинамической структуры циркуляционных потоков металла с рациональным барботажным перемешиванием металла газовыми пузырями для создания условий максимального удаления НВ размером менее 30 мм;

- применение более рациональной конструкции ПК для снижения затягивания НВ в кристаллизатор – это промежуточный ковш с плоским днищем;

- обеспечение минимальной глубины металла в ПК (не менее 0,5 мм), в начале разливки первой плавки и при перековшовке, для исключения затягивания покровного шлака в кристаллизаторы.

**В девятом разделе** "Комплексная технология внепечной обработки, качество конструкционных сталей и экономическая эффективность работы» представлены результаты исследования качества металла, свидетельствующие, что на снижение отсортировки металла по дефектам «плена» и «контроль УЗК» существенное положительное влияние оказывает содержание кальция в стали. При увеличении содержания кальция в стали на каждые 0,0010% наблюдается снижение отсортировки толстолистового проката дефектных плавков по дефекту "плена" и "УЗК", соответственно, на 0,4% и 1,3%. Т.е. более положительное влияние кальция наблюдается на снижение отсортировки металла по дефекту УЗК.

Установлено, что наиболее отрицательное влияние на отсортировку металла по УЗК оказывают хрупкие силикаты, увеличение среднего балла которых на 0,5 приводит к увеличению отсортировки металла по УЗК на 0,5%. При увеличении среднего балла недеформируемых глобулярных силикатов на 0,5 увеличение отсортировки составляет всего 0,2%.

Содержание углерода в стали на повалке в значительной степени влияет на отсортировку металла по УЗК. Так, при сверхнизком содержании углерода в стали на повалке, равном 0,03%, наблюдается стабильно высокая отсортировка металла, которая почти не снижается при повышении содержания кальция. Повышение содержания кальция в металле на каждые 0,001% приводит к снижению отсортировки металла по УЗК всего на 0,3%.

При содержании углерода в стали на повалке 0,05% повышение содержания кальция в металле на каждые 0,001% приводит к значительному снижению отсортировки металла по УЗК, которое составляет порядка 1,3-1,4%. При содержании углерода в стали на повалке 0,06% повышение содержания кальция в металле на каждые 0,001% приводит к снижению отсортировки металла по УЗК на 0,8-0,9 %.

Контроль механических свойств, выполненный на толстом листе толщиной 15,9 мм после ТМП в соответствии с требованиями технических условий, подтверждает влияние углерода после повалки на механические свойства металла, в частности, на предел текучести и прочности.

Таблица 2. Средние значения механических свойств толстолистового проката толщиной 15,9 мм из стали марки Х70

Кол-во плавок, шт	Содержание [C] <sub>пн</sub> , %	б <sub>в</sub> , МПа	б <sub>т</sub> , МПа	δ <sub>5</sub> , н.б. %	КСУ <sup>-60</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	Скорость коррозии, мм/год	Пл. участк. пор. корроз. %
45	0,04 – 0,12	636	487	20	212	2,1	3,8
38	0,06 – 0,08	723	562	22	228	0,8	2,5
Разность значений / %		+87/13,6	+75/15,4	+2/10	+16/21,2	1,3/61,9	-13\34,2
Х80 по API 5L		621-827	552–690				
Х80- Россия		638-736	560				

Таким образом, для обеспечения максимального положительного действия кальция на снижение НВ, отсортировки металла по УЗК и обеспечения высоких ме-



ханических свойств необходимо обеспечить в металле заданное, в зависимости от содержания углерода на повалке, содержание кальция.

Механические свойства конструкционных трубных сталей, представленные в таблице 2 свидетельствуют, что применение разработанных технологических приемов позволяет обеспечить высокие значения механические свойства и приблизить их значения к требованиям к стали категории прочности X80.

Суммарный фактический экономический эффект по данной работе за счет внедрения разработанных технологий составил 11215388 грн. Долевой экономический эффект соискателя составляет 2021261 грн.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена **актуальная научная проблема** повышения механических и служебных свойств металла путем обеспечения минимального остаточного содержания и размера НВ с заданного их структурно-химического состояния. Разработка сквозного технологического процесса внепечной обработки стали на основе новых теоретических представлений об образовании первичных НВ, их модифицировании высокоактивными реагентами, трансформации при вторичном окислении на технологическом участке выпуска металла из конвертера - кристаллизатора МНЛЗ в агрегатах большой вместимости с учетом особенностей, протекающих в них физико-химических, термодинамических, гидродинамических и теплофизических процессов, имеет важное хозяйственное значение в снижении энерго- и материальных ресурсов как при внепечной обработке стали так и при ее дальнейшем применении готового проката.

1. Анализ существующих технологий внепечной обработки конструкционных сталей высокоактивными реагентами показал, что наряду с высокими результатами в повышении качества металла, в целом уровень данных технологий по возможности получения значительного положительного эффекта остается невысоким. Основная причина данной ситуации – недостаточные научные основы процессов образования первичных НВ, их модифицирования высокоактивными реагентами, трансформации при вторичном окислении на технологическом участке выпуска металла из конвертера - кристаллизатора МНЛЗ в агрегатах большой вместимости. Поэтому актуальными являются исследования данных факторов и разработка сквозного технологического процесса внепечной обработки стали, обеспечивающего снижение или полное исключение отрицательного их влияния.

2. На основании выполненных комплексных исследований научно обоснован, разработан и адаптирован к производству конструкционных сталей повышенного качества сквозной технологический процесс внепечной обработки для условий модернизированного сталеплавильного комплекса кислородный конвертер – АКП - КВ - МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком (агрегаты большой вместимостью - 350 т). Наиболее эффективным звеном формирования качества металла является АКП – КВ - МНЛЗ, которое обеспечивает низкое содержание серы – 0,001-0,002%, водорода – не более 1,5-2,0 ppm, азота – не более 4-6 ppm, НВ тонкой серии – до 1,0 балла, снижение неравномерности макро и микроструктуры сляба по малому

и большому радиусу, точечной и осевой неоднородности и, как следствие, значительное повышение качества металла и снижение его отсортировки.

3. На основании результатов физического моделирования гидродинамических поверхностных процессов в сталеразливочном ковше при продувке металла инертным газом выведено универсальное эмпирическое уравнение для определения диаметра открытой поверхности металла в реальных промышленных условиях  $S_{\text{б.з.}} = 0,538 \cdot (F_{\text{об}}^{\text{м}})^2 - 0,01 \cdot F_{\text{об}}^{\text{м}} + 0,083$  без визуального наблюдения в закрытом крышкой АКП, что позволяет значительно снизить вторичное окисление металла.

4. В результате высокотемпературных лабораторных исследований металлошлаковой системы Ca-Al-Si и CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> установлено, что при взаимодействии системы состава анортит образуются деформируемые НВ состава анортит; системы пироксит и глинозит – деформируемые НВ состава, соответственно анортит и псевдо-валлостонит; геленит – твердые недеформируемые НВ на основе оксида кальция и анортид-глинозит – твердые недеформируемые НВ на основе корунда.

5. На основе математического моделирования циркуляционных потоков металла в ПК установлено, что включения размером 200-30 мкм способны покинуть циркуляционные потоки и всплыть в шлак, а менее 30 мкм – структурируются в потоках и движутся с их скоростью без продувки и с продувкой аргоном, соответственно 0,40 и 0,44 м/с, для их удаления расход аргона на продувку через пористый блок должен быть до 15 л/мин, что является достаточным для рафинирования и не приводит к оголению металла. Гидродинамические процессы в промежуточном ковше с плоским днищем увеличивают резидентное время металла в ПК, уменьшают мертвые зоны и улучшают процессы удаления НВ. Значения критерия Ri без продувки аргоном на 4-9% больше чем с продувкой, что свидетельствует о положительном влиянии продувки на удаление НВ.

6. В результате проведенных промышленных экспериментов:

- определены закономерности изменения структурно-химического состояния ковшевого шлака при внепечной обработке стали порошковой проволокой с силикокальцием в сталеразливочных ковшах с футеровкой: хромомagneзит, шамот и муллит и покровного шлака в промежуточном ковше МНЛЗ с футеровкой шамот;

- установлено, что основными параметрами, определяющими степень усвоения кальция по вводу и положительное его влияние на десульфурацию стали на АКП большой вместимости и в ПК МНЛЗ является содержание алюминия в обрабатываемой стали и содержание кальция по вводу, определены закономерности их количественного совместного влияния в виде уравнений регрессии;

- установлены закономерности снижения содержания кальция в стали на технологическом участке АКП-МНЛЗ от его содержания по вводу, времени выдержки металла в сталеразливочном ковше в период от окончания обработки на АКП до разливки на МНЛЗ, а также от совместного влияния содержания кальция и алюминия в стали, выраженное в отношении  $Ca/Al$ ;

- установлены закономерности влияния содержания углерода в металле на выпуске на балл НВ, которые описываются эмпирическими уравнениями, соответственно для хрупких и крупных силикатов тонкой серии:  $НВ_{\text{хр}} = - 0,0796 [C]_{\text{вып}}$

$+1,1787$  и  $НВ_{кр} = -0,0199 [C]_{вып}^2 + 0,0701 [C] + 0,9311$ .

7. На основании выполненных исследований усовершенствованы существующие, разработаны более эффективные и доведены до промышленного применения следующие технологии:

- технология снятия переокисленности металла мелкокусковым углеродсодержащим материалом в процессе выпуска плавки;
- рациональная технология раскисления стали в сталеразливочном ковше в процессе выпуска плавки;
- технология внепечной обработки конструкционной трубной стали в сталеразливочном ковше на АКП с исключением вторичного окисления металла через открытую поверхность;
- технология поточного рафинирования металла от НВ в промежуточном ковше МНЛЗ;
- технология совместного рафинирования стали шлаковыми смесями и порошковыми модификаторами в сталеразливочном ковше;
- разработаны новые составы порошковых материалов на основе высокоактивных элементов и технологические приемы их применения в зависимости от состава ковшевого шлака и футеровки ковша для формирования заданного структурно-химического состояния неметаллических включений;

8 Разработанные научно-технические мероприятия и результаты представленных исследований позволяют, применительно к конкретным промышленным условиям и технологическим особенностям, разработать алгоритм получения НВ заданного остаточного содержания, размеров и структурно-химического состояния при производстве высокопрочных конструкционных сталей для магистральных газо-нефтепроводов, что является перспективой дальнейшего развития темы.

9. Суммарный фактический экономический эффект по данной работе при внедрении разработанных технологий, за счет снижения расхода раскислителей, снижения головной обрезки и брака первого передела по поверхностным дефектам, применения для обработки стали порошковой ленты с алюминием, составил 11215388 грн. Долевой экономический эффект соискателя составляет 2021261 грн.

## СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях*

1. Особенности технологических процессов обработки кальцием конструкционных трубных сталей категории прочности Х70 на агрегате ковш-печь большой емкости / Е.В. Горохов, В.А. Пенчук, **А.Я. Бабанин** и др. // *Электросталлургия*. – 2013. – № 4. – С. 29–31. (*Постановка цели и задачи исследований, обработка результатов плавки и получение закономерностей процесса*).

2. Повышение эффективности десульфурации конструкционной стали для магистральных газо- нефтепроводов / Е.В. Горохов, **А.Я. Бабанин** и др. // *Электросталлургия*. – 2013. – № 6. – С. 25–27. (*Определены основные закономерности влия-*

ния технологических параметров (основность шлака, остаточное содержание кальция и алюминия) на эффективность десульфурации стали).

3. Исследование ковшевого шлака при внепечной обработке стали порошковой проволокой с силикокальцием / **А.Я. Бабанин** и др. // Электрометаллургия. – 2011. – № 2. – С. 20–24. (*Разработана методика и проведены опытно-промышленные плавки по влиянию футеровки ковша на эффективность обработки стали кальцием, определены химический состав шлака и его изменения в процессе обработки*).

4. Массообмен при обработке стали в сталеразливочном ковше порошковой проволокой с кальцийсодержащими реагентами / В.В. Белоусов, В.Д. Александров, **А.Я. Бабанин** и др. // Metallurg. – 2010. – № 3. – С.17–21. (*Разработана методика и выполнен пересчет результатов физического моделирования на промышленные условия массообмена кальция при его вводе в виде порошковой проволокой*).

5. **Бабанин, А.Я.** Частичная замена алюминия силикокальцием при разливке кипящей и полуспокойной стали // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – № 5. – С. 24–27.

6. **Бабанин, А.Я.** Анализ влияния неметаллических включений на отсортировку толстолистового проката стали категории прочности Х70 по сталеплавильным дефектам / Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Сб. научн. трудов. Актуальные проблемы физико-химического материаловедения. – Макеевка: ДонНАСА, 2013. - Вып. 2013-4 (102). - С. 131-134.

7. **Бабанин, А.Я.** Трансформация неметаллических включений в конструкционной трубной стали под влиянием кальция на агрегате ковш-печь / Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Сб. научн. трудов. Современные строительные материалы. – Макеевка: ДонНАСА, 2014. - Вып. 2014-1 (105). - С. 108-110.

8. Повышение эффективности ресурсо-экологических показателей внепечной обработки стали порошковой проволокой с кальцийсодержащими реагентами / В.В. Белоусов, **А.Я. Бабанин** и др. // Metallurg. – 2012. – № 12. – С. 58–62. (*Разработана методика и построена номограмма оценки существующих технологий обработка стали кальцийсодержащими реагентами по степени его усвоения*).

9. Технология ввода реагентов в промежуточный ковш при разливке стали на МНЛЗ / О.В. Носоченко, Д.А. Лившиц, **А.Я. Бабанин** и др. // Сталь. – 2007. – № 6. – С.13-16. (*Разработан способ ввода и технология обработки стали порошковой проволокой с силикокальцием в приемной секции промежуточного ковша, проведена серия опытно-промышленных плавок*).

10. Влияние переходных режимов непрерывной разливки на качество заготовки / Д.А. Дюдкин, В.В. Белоусов, **А.Я. Бабанин** и др. // Сталь. – 2008. – № 9. – С.20–22. (*Определены технические параметры процесса непрерывной разливки на участке стальковш-кристаллизатор МНЛЗ в переходные режимы разливки и выданы исходные данные для математического моделирования циркуляционных потоков металла в ПК. Выполнена проверка адекватности полученных результатов моделирования*).

11. **Бабанин, А.Я.** Раскисление литейной стали порошковым раскислителем / **А.Я. Бабанин**, В.В. Паренчук, Л.А. Позняк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 1. – С. 26-28. *(Разработана ресурссберегающая технология прямой регенерации алюминия из вторичного сырья и проведено ее промышленное опробывание)*.
12. Дюдкин, Д.А. Математическое моделирование потоков металла в трехсекционном ковша слябовой МНЛЗ / Д.А. Дюдкин, В.В. Белоусов, **А.Я. Бабанин** // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – № 4. – С. 47–50. *(Определены технические параметры процесса непрерывной разливки на участке стальковш-кристаллизатор МНЛЗ и выданы исходные данные для математического моделирования потоков металла в ПК, проверена адекватность полученных результатов)*.
13. Паренчук, В.В. Рациональный режим раскисления стали порошковой лентой в сталеразливочных ковшах малой емкости / В.В. Паренчук, В.В. Белоусов, **А.Я. Бабанин** и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 4. – С. 28–29. *(Разработана методика проведения промышленных плавов и отработаны рациональные режимы обработки стали порошковой лентой с ВАР в ковшах малой емкости)*
14. Паренчук, В.В. Рафинирование литейного чугуна активированными шлако-металлическими смесями / В.В. Паренчук, Б.Ф. Белов, **А.Я. Бабанин** // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 3. – С. 31–32. *(На основе теории активированных шлаковых систем разработаны оптимальные составы рафинировочных шлаковых смесей и проведено их промышленное опробывание)*
15. **Бабанин, А.Я.** Модифицирование литейного чугуна кальцийсодержащей порошковой проволокой в разливочных ковшах малой емкости / **А.Я. Бабанин**, В.В. Паренчук, М.К. Дадонов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – № 1. – С. 32–34. *(Отработка рационального режима ввода порошковой проволоки с силикокальцием в разливочный ковш малой емкости для модифицирования серого и повышения качества отливок)*.
16. Носоченко, О.В. Рафинирование стали порошковой проволокой с силикокальцием в промежуточном ковше МНЛЗ / О.В. Носоченко, **А.Я. Бабанин**, В.В. Кислица // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – № 6. – С. 19-21. *(Разработана методика и проведены опытно-промышленные плавки по снижению содержания серы и азота в стали при ее обработке порошковой проволокой с силикокальцием в промежуточном ковше МНЛЗ)*.
17. Предварительное раскисление литейной стали углеродсодержащими материалами / В.В. Паренчук, **А.Я. Бабанин** и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 2. – С. 35–37. *(Разработана методика и проведены опытно-промышленные плавки по комплексной технологии предварительного раскисления стали углеродсодержащими материалами)*.
18. Параметры барботажной зоны в сталеразливочных ковшах различной вместимости при продувке металла инертным газом / Д.А. Дюдкин, В.В. Белоусов, **А.Я. Бабанин** и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2012. – № 5. – С.14–18. *(Разработана методика и проведены исследования методом физи-*

ческого моделирования изменения параметров барботажной зоны в зависимости от условий усреднительной продувки. Выведена величина, равная линейной обратной силе газового потока, для определения параметров открытой поверхности расчетным путем).

19. Improvement in efficiency, resource and ecological indices for extra-furnace steel treatment with flux-cored wire containing calcium reagents / V.V. Belousov, **А.Я. Babanin** et al. // Metallurgist. Vol. 56. Nos. 11-12. March. 2013 (Russian Original Nov.–Dec. 2012). Translated from Metallurg. No. pp. 58-62. December 2012. *(Разработана методика и построена номограмма оценки существующих технологий обработка стали кальцийсодержащими реагентами по степени его усвоения).*

20. Mass transfer during the treatment of steel-pouring ladle with cored wire containing a calcium-reagent / V.V. Belousov, V.D. Aleksandrov, **А.Я. Babanin** et al. // Metallurgist. Vol. 54. Nos. 3-4. 2010. Translated from Metallurg. No. pp. 51-54. March 2010. Original article submitted September 25, 2009. *(Разработана методика и выполнен пересчет результатов физического моделирования на промышленные условия массообмена кальция при его вводе в виде порошковой проволокой).*

21. Influence of transient condition in continuous casting on billet quality / D.A. Dyudkin V.V. Belousov, **А.Я. Babanin** et al. // ISSN 0967-0912 (1935-0988), Steel in Translation, 2010. Vol. 38. No. 9. pp. 748-751. DOI: 10.3103/80967091208090118. *(Определены технические параметры процесса непрерывной разливки на участке сталковши-кристаллизатор МНЛЗ в переходные режимы разливки и выданы исходные данные для математического моделирования циркуляционных потоков металла в ПК. Выполнена проверка адекватности полученных результатов моделирования).*

22. The influence of technological parameters of X70 stainless steel ladle refining on the residual content of non-metallic inclusions / **А. Babanin** et al. // ISSN 1897-3310. Archives of foundry engineering. Volume 15, Issue 3/2015, pp. 5-10 *(Разработана методика и проведены исследования, определены закономерности влияния на остаточное содержание НВ в виде силикатов хрупких и недеформированных содержания углерода в стали на повалке и технологическое время нахождения металла в сталеразливочном ковше).*

23. Высокотемпературное шлаковое рафинирование литейного чугуна (ВШР-процесс) / **А.Я. Бабанин** и др. // Материалы VI междунаучно-техн. конф. «Тепло-массообменные процессы в металлургических системах», посв. 70-летию Приазовского технического университета (7-9 сентября 2000г.). – Мариуполь. – С. 218-221. *(Разработан процесс высокотемпературного шлакового рафинирования литейного чугуна и проведены его промышленные испытания в условиях литейного цеха РМЗ).*

#### **Научные работы в виде монографий**

24. Ковшевая обработка литейных расплавов порошковыми лентами и проволоками / **А.Я. Бабанин** и др. // Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд». – 2008. – 137 с. *(Разработаны основные положения теории и практики обработки литейных расплавов порошковыми лентами и проволоками с химически активными реагентами в ковшах малой емкости и с малой глубиной металла, проведены лабораторные и промышленные исследования обработки стали монолитными алюминиевыми проволоками и порошковыми проволоками (лентами) с алюминий и кальций-*

содержащими реагентами, разработаны технологии для их промышленного применения).

25. Обработка железо-углеродистых расплавов высокоактивными реагентами / **А.Я. Бабанин** и др. - Донецк: Восточный издательский дом, 2015. - 219 с. (Проведены исследования различных способов промышленного применения сплавов кальция для обработки стали на различных металлургических предприятиях в ковшах с различной футеровкой: присадкой в виде кусков, вдуванием в струе инертного газа через погружную фурму и вводом в виде порошковой проволоки, разработаны основные положения механизма образования шлаковых и неметаллических включений при обработке стали высокоактивными реагентами).

26. Эффективная эксплуатация строительных машин в условиях Донбасса: справочное пособие. Разд. 3.5 -Применение конструкционных материалов производства Украины в рабочих органах и базовых элементах зарубежной техники// В.А. Пенчук, **А.Я. Бабанин**, С.В. Демочкин под общ. ред. В.А. Пенчука. - Донецк: Изд-во «Ноулидж» (Донецкое отделение). - 2012. – 787с. (Выполнен аналитический обзор конструкционных сталей производства наиболее развитых стран мира (США, Евросоюз, Япония, ФРГ, Китай и др.) их маркировка, назначение, механические, служебные и технологические свойства и разработана методика их равноценной замены сталями отечественного производства)..

#### **Научные работы, опубликованные в других журналах и изданиях**

27. Влияние состава покровного шлака на окислительно-восстановительные процессы в расплаве высокоактивных элементов / **А.Я. Бабанин** и др. // Бюл. НТИ-ЭН «Черная металлургия». – 2009. – № 3. – С.48–50. (Разработана методика и лабораторная установка для исследования структурно-фазового состояния металлошлаковой системы, проведены лабораторные исследования и определены закономерности протекающих окислительно-восстановительных процессов тройной системы алюминий-кремний –кальций и их окислов).

28. Ресурсосберегающая технология раскисления стали прямой регенерацией алюминия из алюминиевой стружки / В.В. Паренчук, Н.П. Мацаренко, **А.Я. Бабанин** и др. // Бюл. НТИ. Черная металлургия. – 2007. – № 2. – С. 42–44. (Проведены опытно-промышленные плавки и разработана ресурсосберегающая технология раскисления стали алюминием).

29. Номограммы расхода мелкокусковых карбонизаторов для науглероживания сталей в процессе наполнения ковша / В.И. Сельский, **А.Я. Бабанин** и др. // Бюл. НТИ. Черная металлургия. – 1990.- №8. – С. 62. (Разработана номограмма определения расхода мелкокусковых карбонизаторов для раскисления и корректировки содержания углерода в стали в узких заданных пределах).

30. Assessing the impact of the turbulence and the bubbling in the process of continuous refinement of steels in the bath of the tundish ladle ccm / V. Belousov, **A. Babanin** et al. //Study of problems in modern science new technologies in engineering. Monograph. - ISBN 978-617-7094-42-4. - Wydgoszcz – 2015. - 753 p. (Выданы исходные данные в виде физические параметры образующихся НВ при обработке стали силикакальцем в промежуточном ковше МНЛЗ для расчета параметров их удаления и проверена адекватность полученных результатов).

***Научные работы и тезисы докладов в материалах конференций***

31. Структурно- химическое исследование металлургических шлаков в жидком и твердом состояниях и разработка новых активированных комплексных материалов для раскисления и лесульфурации стали / О.В. Носоченко, С.Г. Мельник, В.И. Ганюшенко, Б.Ф. Белов, **А.Я. Бабанин** и др. // Труды IV Конгресса сталеплавильщиков. – Москва. – 1997. – С. 309 -312. *(Проведение серийных и опытно-промышленных плавов с исследованием рафинировочной способности ковшевых шлаков, определение оптимальных составов рафинировочных порошковых материалов, обеспечивающих при вдувании максимальную десульфурацию стали).*

32. Белов Б.Ф. Структурное состояние и рафинировочная емкость силикатных шлаков / Б.Ф. Белов, В.В. Паренчук, **А.Я. Бабанин** // Труды IX Межд. Конгресса сталеплавильщиков (г. Старый Оскол, 17-19 октября 2006 г.). – Москва-Старый Оскол. – 2007. - С.552–556. *(Разработана технология рафинирования стали силикатными шлаками, включающая активацию силикатного шлака термическим или химическим воздействием, разработаны мероприятия для ее промышленного применения).*

33. Гидродинамические и теплофизические процессы в ванне промежуточного ковша: материалы VI-го Международного Форума по тепло- и массообмену, (г. Минск, 19-23 мая 2008 г.). Тезисы докладов и сообщений. Т.2 / В.Ф. Комаров, В.В. Белоусов, Ф.В. Недопекин, **А.Я. Бабанин**. – С. 320–321. *(Расписан физический процесс, определены расчетным путем и выданы исходные данные для математического моделирования гидродинамических и тепло-физических процессов, протекающих в приемной секции трех-секционного промежуточного ковша в период перековшовки, разработаны рекомендации для повышения чистоты металла по НВ).*

34. Исследование ковшевого шлака при внепечной обработке стали порошковой проволокой с силикокальцием / **А.Я. Бабанин** и др. // Труды XI Межд. Конгресса сталеплавильщиков (Нижний Тагил, 3-8 октября 2010 г.). – Москва. – 2011. – С.355–560. *(Разработана методика и проведена серия опытно-промышленных плавов по исследованию изменения структурно-химического состояния покровного шлака при обработке стали порошковой проволокой с силикокальцием, выданы рекомендации для повышения степени десульфурации стали в ковшах с различной футеровкой).*

35. **Бабанин А.Я.** Исследование состава покровного шлака в промежуточном ковше МНЛЗ // Сб. научн. труд. конференции «50-лет непрерывной разливки в Украине». – Донецк. - Изд. «Ноулидж» (Донецкое отд.), 2010. – С. 500–506.

36. Волновые процессы в сталеразливочном ковше при продувке стали инертным газом / **А.Я. Бабанин** и др. // Труды IX Межд. Конгресса сталеплавильщиков (г. Старый Оскол, 17-19 октября 2006 г.). – Москва-Старый Оскол, 2007. - С.494–500. *(Разработана методика и проведено физическое моделирование волновых процессов, образующихся в сталеразливочном ковше при продувке металла инертным газом, получены эмпирические уравнения, описывающие частные условия и общую закономерность).*



### Авторские свидетельства и патенты

37. А.с. 1788031 СССР, МКИ С21С7/00, В22D11/10. Плакированный порошковый модификатор / Б.Ф. Белов, Ю.А. Данилович, Г.А. Дорофеев, А.И. Троцан, Ф.С. Крейденко, **А.Я. Бабанин** и др. (СССР) - № 4928672/02; заявл. 6.04.91; опубл. 15.01.93, Бюл. №2.- 4 с. *(Выполнены промышленные испытания разработанного состава плакированного порошкового модификатора и определены его технико-экономические показатели).*

38. А.с. 1766966 СССР. МКИ С21С7/00. Способ обработки жидкого металла в ковше / Г.А. Дорофеев, **А.Я. Бабанин**, Л.В. Коваленко (СССР) - №4872435/02; заявл. 18.07.90; опубл. 07.10.92, Бюл. № 37. - 4 с. *(Разработаны основные положения способа обработки металла в сталеразливочном ковше продувкой инертным газом, обеспечивающим снижение вторичного окисления металла через открытую поверхность).*

39. Патент 21242 Україна, МПК С21С7/00. Порошковий дріт або стрічка / **Бабанін А.Я.** та ін.; **Бабанін А.Я.** - № u200607718; заявл. 10.07.2006; опубл. 15.03.2007. Бюл. №3. *(Разработан состав порошкового алюминийсодержащего материала и определены оптимальные соотношения алюминия и его окисла).*

40. Патент 27618 Україна, МПК В22D7/00. Спосіб розливання киплячої та напівспокійної сталі / Кукуй Д.П., **Бабанін А.Я.** та ін; Кукуй Д.П. - u200706732, заявл. 15.06.2007, опубл. 12.11.2007. Бюл. №18. *(Предложены оптимальные соотношения алюминиевой дроби и силикокальция, подаваемых одновременно в центровую, для раскисления стали и закупоривания слитка).*

Подписано к печати \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2016 г. Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Бумага мелованная. Гарнитура «Newton». Печать – лазерная. Ус. печ. л. 2,0. Заказ №0916. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Издательства «Донецкая политехника»  
на цифровом лазерном издательском комплексе Xerox DocuColor 2060  
Тел.: +380 (62) 304-60-82