



В настоящее время на металлургических предприятиях внепечная обработка конструкционных сталей, как правило, заключается, в их обработке на агрегате ковш-печь и, в случае необходимости, ковшевом вакууматоре, что является недостаточным для формирования в стали неметаллических включений заданных параметров. В связи с этим, для создания более эффективного сквозного технологического процесса внепечной обработки стали необходимо решение следующих задач в теоретической и практической постановке вопросов:

1. Исследовать особенности образования первичных неметаллических включений в конструкционных сталях в сталеразливочном ковше при раскислении марганцем, кремнием и алюминием в процессе выпуска плавки из конвертера и оценить их влияние на качество металла.

2. Разработать методику физического моделирования гидродинамических процессов в сталеразливочном ковше в агрегате ковш-печь (АКП) при усреднительной продувке аргоном, провести исследования и разработать метод определения диаметра открытой поверхности металла расчетным путем.

3. Разработать методику и провести высокотемпературные исследования химического взаимодействия жидкой металло-шлаковой системы  $\text{Ca-Al-Si}$  и  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  для определения закономерностей изменения структурно-химического состояния неметаллических включений при их модифицировании высокоактивными реагентами.

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

- первичных, образующихся в ковше при раскислении стали в процессе выпуска плавки;
- модифицированных высокоактивными реагентами в агрегате ковш-печь;
- 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 футеровки ковша.

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

7. Разработать математическую модель циркуляционных потоков металла в промежуточном ковше МНЛЗ и исследовать закономерности рафинирования стали от неметаллических включений под воздействием гидродинамических и барботажных процессов.

8. Продолжить развитие научных основ, разработать сквозной технологический ресурсо- и энергосберегающий процесс и реализовать его 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 стали в сталеразливочном ковше на агрегате ковш-печь с исключением вторичного окисления металла через открытую поверхность;
- технология рафинирования металла от неметаллических включений в промежуточном ковше МНЛЗ;
- технология совместного рафинирования стали шлаковыми смесями и порошковыми модификаторами в сталеразливочном ковше.

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

### **Основные научные результаты и их значимость для науки и производства**

#### **Основные научные результаты, полученные автором:**

1. Анализ существующих технологий внепечной обработки конструкционных сталей, показывает, что наряду с высокими результатами повышения качества металла, в целом уровень данных технологий по возможности получения значительного положительного эффекта остается невысоким. Основная причина данной ситуации – недостаточно разработанные научные основы процессов образования, модифицирования и трансформации неметаллических включений на технологическом участке от выпуска металла из конвертера до кристаллизатора МНЛЗ в агрегатах большой вместимости. Поэтому актуальными являются исследования влияния данных факторов и разработка сквозного технологического процесса внепечной обработки конструкционной 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 их внепечной обработки для условий модернизированного сталеплавильного комплекса кислородный конвертер – АКП - КВ - МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком (агрегаты 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 бо-

лее 4-6 ppm, неметаллических включений 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 механических, служебных свойств и снижение его отсортровки.

3. На основании результатов физического моделирования гидродинамических поверхностных процессов в сталеразливочном ковше при продувке металла аргоном получено эмпирическое уравнение для определения площади открытой поверхности металла, которое качественно подтверждается в реальных промышленных условиях ( $S_{б.з.} = 0,538 \cdot (F_{об}^M)^2 - 0,01 \cdot F_{об}^M + 0,083$ ) и позволяет без визуального наблюдения контролировать размеры открытой поверхности металла и значительно снизить вторичное его окисление.

4. В результате высокотемпературных лабораторных исследований металл-шлаковой 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 неметаллические включения состава анортит; системы пироксит и глинозит – деформируемые включения состава, соответственно анортит и псевдо-валлостонит; геленит – твердые недеформируемые включения на основе оксида кальция и анортит-глинозит – твердые недеформируемые на основе корунда.

5. На основании результатов математического моделирования движения частицы алюмината кальция в циркуляционных потоках металла в промежуточном ковше 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, соответственно, без продувки и с продувкой аргоном, равной 0,40 и 0,44 м/с. Для их удаления расход аргона на продувку через пористый блок не должен превышать более 15 л/мин, что является достаточным для рафинирования металла и не приводит к его оголению. Гидродинамические процессы в промежуточном ковше с плоским днищем увеличивают резидентное время металла в нем, уменьшают мертвые зоны и улучшают процессы удаления неметаллических включений, при этом значения критерия Ri без продувки аргоном на 4-9% больше чем с продувкой, что свидетельствует о положительном влиянии продувки на удаление включений.

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 в АКП большой вместимости и в ПК МНЛЗ является содержание алюминия в обрабатываемой стали и содержание кальция по вводу, определены за-

кономерности их количественного совместного влияние 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 в АКП до разливки на МНЛЗ, а также от совместного влияния содержания кальция и алюминия в стали, выраженное в отношении  $Ca/Al$ ;

- установлено влияние содержания углерода в металле на выпуске на балл тонкой серии хрупких и крупных неметаллических включений, для низколегированных конструкционных сталей оптимальное его содержание находится в диапазоне 0,06-0,08%.

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 стали в сталеразливочном ковше в АКП с исключением вторичного окисления металла через открытую поверхность;

- технология поточного рафинирования металла от неметаллических включений 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 предложения и результаты представленных исследований позволяют, применительно к конкретным промышленным условиям и технологическим особенностям, разработать алгоритм получения неметаллических включений заданного остаточного содержания, размера и структурно-химического состояния при производстве высокопрочных конструкционных сталей, что является одним из направлений дальнейшего развития темы.

**Значимость для науки результатов исследований** заключается в том, что разработаны следующие методологии:

- разработки сквозного технологического процесса внепечной обработки конструкционных сталей на основе управления процессами образования, модифицирования и трансформации НВ, и их поэтапного удаления;

- управления размерами, образующейся открытой от шлака поверхности металла в сталеразливочном ковше на АКП в зависимости от технологических

параметров его усреднительной продувки аргоном:

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

Определена количественная функциональная зависимость влияния структурно-химического состояния ковшевого и покровного шлаков при обработке стали высокоактивными реагентами и химического состава футеровки (хромагнетит, шамот и муллит) на структурно-химическое состояние остаточных неметаллических включений. Выявлен характер влияния состава алюминатов кальция, образующихся при внепечной обработке стали кальцийсодержащими реагентами и их способности к гидратации и гидрогенизации на механические и служебные свойства стали. Определены закономерности удаления неметаллических включений в промежуточном ковше МНЛЗ в процессе непрерывной разливки под воздействием гидродинамических и барботажных процессов.

Таким образом, разработанные теоретические основы позволили разработать сквозной технологический процесс внепечной обработки конструкционных сталей на технологическом участке от выпуска металла из конвертера до кристаллизатора МНЛЗ, обеспечивающий качество металла на верхних пределах ГОСТ-а по данной марке стали и с учетом дополнительных условий конракта.

**Практическое значение результатов работы** заключается в том, что разработанные теоретические положения нашли применение при решении таких задач, как снятие переокисленности металла перед раскислением; образование первичных неметаллических включений легко удаляемых из стали; снижение вторичного окисления металла при усреднительной продувке на агрегате ковш-печь; удаление неметаллических включений в промежуточном ковше в процессе непрерывной разливки путем оптимизации гидродинамических и барботажных процессов; оптимизация переходных режимов непрерывной разливки стали с целью исключения затягивания шлака в кристаллизаторы.

Результаты диссертационной работы внедрены на РУП «Белорусский металлургический завод», ОАО «Торезтвердосплав», НПО «ДОНИКС», ОАО «Донцемент» и ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры».

#### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Считаем целесообразным продолжить работу по совершенствованию разработанных в диссертации технических решений применительно к другим металлургическим предприятиям по внепечной обработке конструкционных сталей.

В частности, предложенная методология разработки сквозного технологического процесса внепечной обработки может применяться в агрегатах

средней вместимости как в конвертерном так и электросталеплавильном производстве, а также разработанные технологические операции могут найти применение самостоятельно в современных сталелитейных комплексах.

Интересными для промышленного использования являются разработанные математические модели управления циркуляционными потоками металла в промежуточном ковше МНЛЗ для удаления неметаллических включений. Они позволяют оптимизировать конструкцию промежуточного ковша при применении новых устройств управления циркуляционными потоками металла, а также при разработке и изготовлении более современных МНЛЗ и сталелитейных комплексов.

Лабораторная установка для моделирования усреднительной продувки металла в сталеразливочном ковше аргоном может быть применена для исследования гидродинамических процессов в агрегатах ковш-печь различной вместимости применительно к созданию более современных агрегатов и продувочных устройств.

Опыт показал, что применение теории МГС-фаз для описания структурно-химического состояния неметаллических включений позволяет анализировать их состояния, начиная с образования и до заданного структурно-химического состояния.

Расширение объемов внедрения предложенных технических решений может быть осуществлено на металлургических предприятиях России, Белоруссии и др. стран, массово производящих конструкционные стали.

#### **Общие замечания**

Как недостаток отмечаем, что в работе не нашло отражение исследование влияние окисленности металла на процессы образования первичных неметаллических включений, на процессы их модифицирования высокоактивными реагентами и трансформации в результате вторичного окисления. Исходя из этого, можно было бы установить оптимальный верхний предел остаточного содержания в стали кальция.

Наряду с тем, что в работе представлены результаты промышленных плавок с определением диаметра открытой поверхности металла при усреднительной продувке аргоном через донные продувочные устройства, однако отсутствуют результаты лабораторных гидродинамических исследований усреднительной продувки металла через донные продувочные устройства (блоки, узлы и т.д.) различной конструкции.

При высоко-температурных исследованиях взаимодействия металл-шлаковой системы  $\text{Ca-Si-Al}$  и  $\text{CaO-SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ , выполненных на лабораторной установке индукционного нагрева с графитовым тиглем, целесообразно было бы выполнить исследования по всему диапазону соотношений компонентов, что позволило бы глубже проанализировать изменения данной системы применительно к модифицированию неметаллических включений кальцием в конструкционных сталях.

В диссертационной работе выполнен значительный анализ неметаллических включений по теории МГС-фаз (первичных, после модифицирования, а также в результате трансформации), однако не представлены результаты исследований методом растровой электронной микроскопии (электронная металлография и фрактография) или микрорентгеноспектральным анализом неметаллических включений какого то данного конкретного структурно-химического состояния.

Также в диссертации не рассматриваются вопросы защиты струи металла, истекающей из сталеразливочного ковша в промежуточный на предмет вторичного окисления от взаимодействия с кислородом воздуха. Кроме того, не рассматриваются вопросы влияния параметров циркуляционных потоков в промежуточном ковше на вторичное окисление металла от взаимодействия с покровным шлаком, как в стационарные режимы разливки, так и в переходные.

### Заключение

В диссертационной работе решена важная научно-техническая проблема повышения качества конструкционных сталей на основе развития научных основ и технологии внепечной обработки конструкционных сталей и создания на этой базе сквозного технологического процесса, обеспечивающего повышение качества, механических и служебных свойств металла, снижения его отсортировки и повышения выхода годного. Решение проблемы имеет важное хозяйственное значение для производства конструкционных сталей более высокого качества, что позволит повысить качество производимой из них продукции и увеличить срок их эксплуатации. Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу. Новые научные результаты, полученные диссертантом имеют существенное значение для металлургической промышленности, науки и практики совершенствования технологии производства и внепечной обработки конструкционных сталей. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Работа отвечает требованиям п. 2.1 Положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

**Отзыв обсужден и одобрен** на заседании кафедры «Металлургия черных металлов» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Луганской Народной Республики «Донбасский государственный технический университет» «02» декабря 2016 г., протокол № 12

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургия черных металлов» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Луганской Народной Республики «Донбасский государственный технический университет»,  
94204, ЛНР, г. Алчевск, пр. Ленина, 16, тел.: +380 (6442) 2-89-62,  
эл. почта: kaf.mchm.donqtu@yandex.ru.

Новохатский Александр Михайлович