

ISSN 0372-2929

ISSN 0132-0890

**ЦВЕТНЫЕ
МЕТАЛЛЫ**

**Черные
металлы**

www.rudmet.ru

• СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК •

2014

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ • ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ • Специальный выпуск • 2014



115 лет

*Санкт-Петербургскому
государственному
политехническому университету*



УДК 669.184

Управление процессами образования неметаллических включений при производстве конвертерной стали*



А. А. Казаков
Докт. техн. наук, профессор,
СПбГПУ,
kazakov@thixomet.ru



П. В. Ковалев
Канд. техн. наук, доцент,
СПбГПУ



С. В. Рябошук
Ассистент, СПбГПУ



М. В. Жиронкин
Менеджер по внепечной обработке,
Центр компетенций по стали,
ОАО «Северсталь», Череповец



А. В. Краснов
Главный технолог
сталеплавильного производства,
ОАО «Северсталь», Череповец

Залогом получения листового проката высокого качества является обеспечение высокой чистоты стали по неметаллическим включениям, газам и вредным примесям. Такие характеристики, как количество, морфология и характер распределения включений в металлической матрице, закладываются в первую очередь на этапе раскисления и модифицирования стали при ее внепечной обработке. Технология раскисления стали, включающая выбор типа используемых раскислителей и модификаторов, последовательность и способ их ввода в стальной расплав, должна обеспечивать наиболее полное удаление образующихся крупных неметаллических включений из жидкого металла. Оставшиеся в готовом металле мелкие включения должны иметь благоприятную морфологию, а их количество должно быть минимальным [1].

Изучена природа образования и особенности эволюции неметаллических включений по ходу сталеплавильного передела конвертерной стали трубного сортамента (22ГЮ, 10Г2ФБ, 09ГСФ). Установлено, что наиболее благоприятными с точки зрения морфологии являются неметаллические включения системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, близкие по составу к моноалюминатам кальция $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$, содержащим до 5–6 % MgO. Такие мелкие включения образуются на эндогенных подложках из MgO при достаточном содержании кальция в стальном расплаве. Отбраковка листов происходит из-за крупных включений би- и гексаалюминатов кальция ($\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$), часто содержащих экзогенные MgO. Эти крупные тугоплавкие соединения образуются при недостатке кальция, в частности при длительном пребывании стали в ковше. Определены критические параметры и разработаны технологические рекомендации по снижению загрязненности металла неметаллическими включениями: повышено соотношение кальция к алюминию, вводимых для раскисления и модифицирования, сокращен временной интервал между присадками алюминия и кальция в расплав, скорректировано общее время внепечной обработки, проведены мероприятия по снижению вторичного окисления расплава на разливке. Согласно рекомендациям проведено 25 тестовых плавов и исследованы на загрязненность неметаллическими включениями образцы, отобранные из 128 горячекатаных листов штрипса. Результаты металлографического анализа показали, что 95 % готового проката имеет загрязненность не более чем 2,0 балла по ГОСТ 1778-70 (метод Ш6).

Ключевые слова: неметаллические включения, трубная сталь, раскисление, модифицирование, штрипс, загрязнение, алюминаты.

* Статья подготовлена при участии А. Е. Козлова.

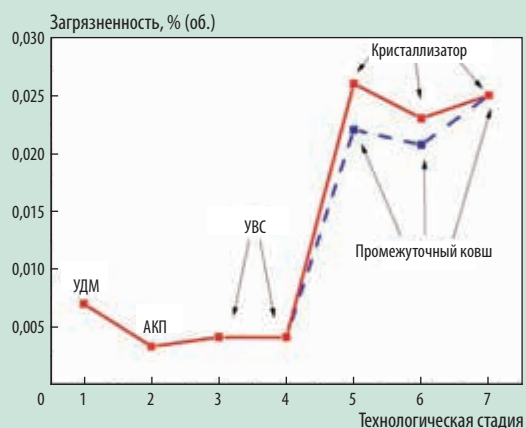


Рис. 1. Изменение объемной доли неметаллических включений в металле по ходу внепечной обработки и непрерывной разливки

Данная работа посвящена исследованию неметаллических включений, образующихся в конвертерной стали трубного сортамента (22ГЮ, 10Г2ФБ, 09ГСФ и др.) по ходу внепечной обработки и разливки. Основная цель исследований заключается в разработке технологии, обеспечивающей загрязненность штрипса неметаллическими включениями не более второго балла по ГОСТ 1778-70.

Авторами статьи проведены исследования металла, полученного в условиях ОАО «Северсталь». Шлифы изготавливали на оборудовании для подготовки проб компании Buehler Ltd. Металлографические исследования проводили на моторизованных микроскопах Nikon Epiaphot TME и Zeiss Axiovert 200 MAT, оснащенных анализаторами изображения Thixomet Pro. Микрорентгеноспектральный анализ включений (МРСА) проводили на электронном микроскопе Zeiss Supra 55VP с приставкой Inca (Oxford Instruments).

Термодинамическое моделирование проводили с помощью коммерческого программного обеспечения Fact

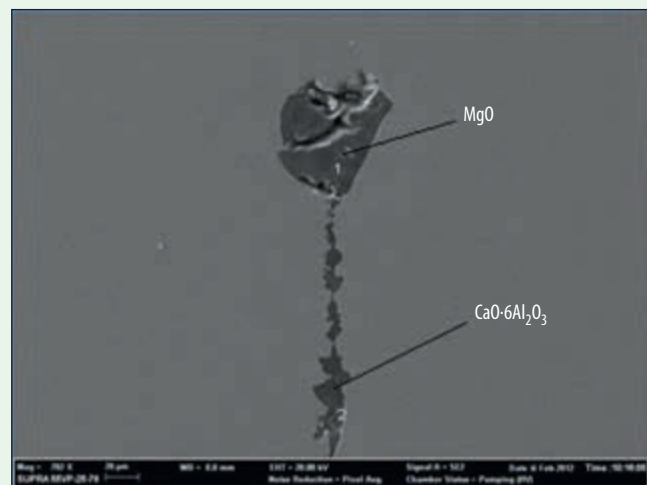


Рис. 2. Тугоплавкие строчечные включения, обнаруженные в структуре металла

Sage с использованием баз данных FSstel и FToxid [2], а также оригинальной программы, разработанной на кафедре «Металлургические технологии» ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» для описания формирования эндогенных неметаллических включений при модифицировании стали кальцием. Были рассчитаны температурные зависимости массы неметаллических включений, образующихся по ходу охлаждения и кристаллизации стали. Учитывались химические реакции формирования в жидкой стали всех возможных соединений в рамках системы Fe–Ca–Al–Si–Mn–S–O.

Загрязненность неметаллическими включениями образцов литого металла оценивали по стандарту ASTM E-1245-03.

Анализ полученных результатов показал, что для всех рассмотренных плавок, полученных по базовой заводской технологии, наблюдается общая тенденция, связанная с повышением загрязненности металла неметаллическими включениями в процессе непрерывной разливки. В среднем по плавкам уровень загрязненности стали в процессе обработки на установках доводки металла (УДМ), агрегате ковш-печь (АКП) и установке вакуумирования стали (УВС) не превышает 0,015 % (об.). В процессе непрерывной разливки это значение может увеличиваться в 1,5–2 раза и достигать до 0,03 % (об.). На рис. 1 представлен пример изменения объемной доли неметаллических включений в жидком металле по ходу внепечной обработки и разливки для одной из исследованных плавок. В данном случае объемная доля включений к концу внепечной обработки составляет менее 0,005 % (об.), однако в процессе непрерывной разливки она увеличивается до 0,02–0,025 % (об.).

Таким образом, эффективность мероприятий, реализуемых в процессе внепечной обработки, целью которых является рафинирование стали от неметаллических включений, может быть значительно снижена вследствие развитых процессов вторичного окисления стали в процессе непрерывной разливки.

Оценку загрязненности неметаллическими включениями образцов горячекатаного листа (штрипса), полученного из металла исследованных плавок, проводили с помощью двух различных методик: ASTM E-1245-03 и ГОСТ 1778-70. Исследовали фазовый состав крупных строчек включений, превышающих второй балл по ГОСТ 1778-70, наличие которых является одной из основных причин снижения качества металлопродукции и повышения степени отбраковки листов. Как правило, эти крупные строчки представляют собой эндогенные и экзоэндогенные многофазные включения системы CaO–Al₂O₃–MgO, близкие по составу к гекса- (CaO·6Al₂O₃) и биалюминатам кальция (CaO·2Al₂O₃). В состав таких включений может входить оксид магния MgO экзогенного происхождения, попадающий в расплав из футеровки ковша. Температура плавления данной группы включений превышает температуру жидкого расплава ($T_{пл} > 1700$ °C), поэтому образуются тугоплавкие конгломераты с прослойками железа, впоследствии при прокатке преобразующиеся в хрупкие строчки (рис. 2).



Также в структуре металла встречаются крупные строчки, по составу близкие к соединению $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, которое соответствует эвтектике в системе $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ [3]. При температурах внепечной обработки такие легкоплавкие включения ($T_{\text{пл}} \approx 1360$ °С) образуются в жидком состоянии в момент ввода кальцийсодержащего модификатора в расплав при значительном пересыщении металла кальцием. Образующиеся эндогенные шлаковые капли легко коалесцируют, укрупняются и удаляются из жидкой стали, однако те частицы, которые остаются в стали, впоследствии образуют крупные труднодеформируемые вытянутые включения.

Установлено, что из исследованных включений наиболее благоприятными с точки зрения морфологии являются соединения системы $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$, близкие по составу к моноалюминатам кальция $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ и содержащие до 5–6 % MgO . Эти включения небольшого размера (6–8 мкм) образуются в жидком состоянии, имеют сферическую форму, которая при пластической обработке практически не претерпевает изменений.

С целью исследования эволюции фазового состава неметаллических включений по ходу внепечной обработки и разливки был проведен МРСА образцов литого металла, отобранных на всех основных стадиях обработки стали (после выпуска из конвертера, на агрегате ковш-печь, до и после модифицирования кальцием, из промежуточного ковша и кристаллизатора в процессе непрерывной разливки). Также были исследованы рабочие поверхности фильтрационных перегородок промежуточных ковшей и погружных стаканов. Фазовый состав обнаруженных включений оценивался с учетом результатов термодинамического моделирования [4].

Далее рассмотрено изменение состава неметаллических включений, образующихся в процессе внепечной обработки жидкой стали. После выпуска стали из кислородного конвертера при одновременном вводе легирующих материалов и раскислителей (вторичного алюминия и силикомарганца) образуются неметаллические включения системы $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{FeO}$ (корунд, герцинит, алюмосиликаты). Мелкие включения корунда формируются при значительных пересыщениях металла по кислороду и алюминию. Часть этих включений удаляется из стали при ее обработке на установке доводки металла за счет низкой адгезии к матричному расплаву, однако небольшое количество включений вследствие малых размеров остается в стали к моменту ее модифицирования.

После модифицирования расплава кальцийсодержащими материалами (феррокальцием или силикокальцием) в металле образуются неметаллические включения следующих типов: жидкие оксидные соединения системы $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$; биалюминаты кальция ($\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$); сульфиды кальция, представленные в виде одиночных неметаллических включений и в составе многофазных включений в качестве плакирующей оболочки. Кроме того, в металле были обнаружены алюмосиликатные включения и корунд, которые присутствовали в расплаве еще до мо-

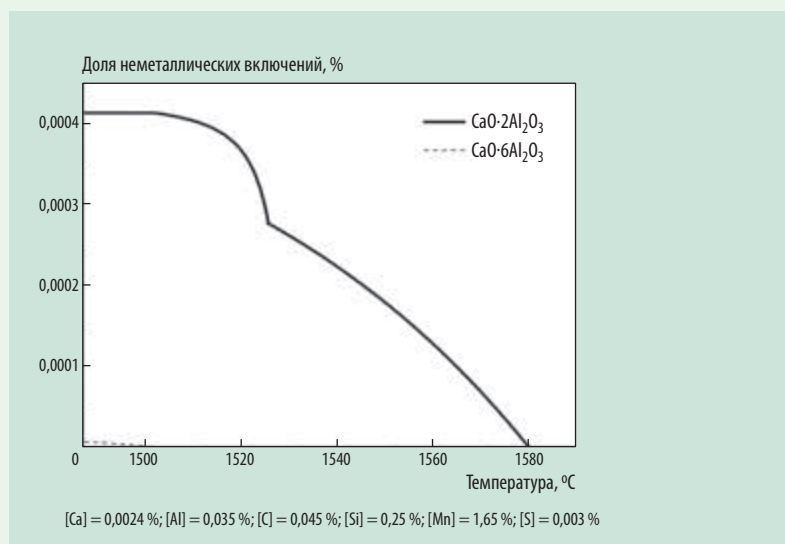


Рис. 3. Результаты моделирования процесса формирования неметаллических включений для трубной стали

дифицирования. Часто в металле могут присутствовать экзогенные частицы шлака (глобули, близкие по составу к покровному шлаку) и футеровки (крупные включения, имеющие в основе MgO).

В соответствии с результатами термодинамического моделирования процесса модифицирования стали кальцием основным равновесным типом включений, которые образуются при конкретных температурно-концентрационных условиях, является биалюминат кальция $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (рис. 3).

Вводимый в расплав кальций не распределяется по объему ковша мгновенно и равномерно, поэтому в разных точках расплава могут реализовываться различные соотношения между содержанием алюминия и кальция $[\text{Al}]/[\text{Ca}]$, что приводит к формированию неметаллических включений самого различного состава в условиях соответствующего локального равновесия. В частности, в непосредственной области ввода модификатора в условиях значительного пересыщения расплава кальцием образуются эндогенные жидкие включения, близкие по составу к $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$. В дальнейшем в процессе промывочного периода (усреднительной продувки) внепечной обработки, когда реагенты распределены равномерно, происходит постепенная перекристаллизация этих ставших неравновесными включений, в результате чего их средний состав все в большей степени приближается к равновесному составу ($\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$). Действительно, на данном этапе внепечной обработки в металле были обнаружены многофазные неметаллические включения, имеющие промежуточную структуру, состоящую при температурах модифицирования из твердой (Al_2O_3 , $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) и жидкой ($\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$) фаз.

Исследование отложений на фильтрационных перегородках промежуточных ковшей показало, что преобладающим типом осаждающихся на них включений являются соединения системы $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$, в частности

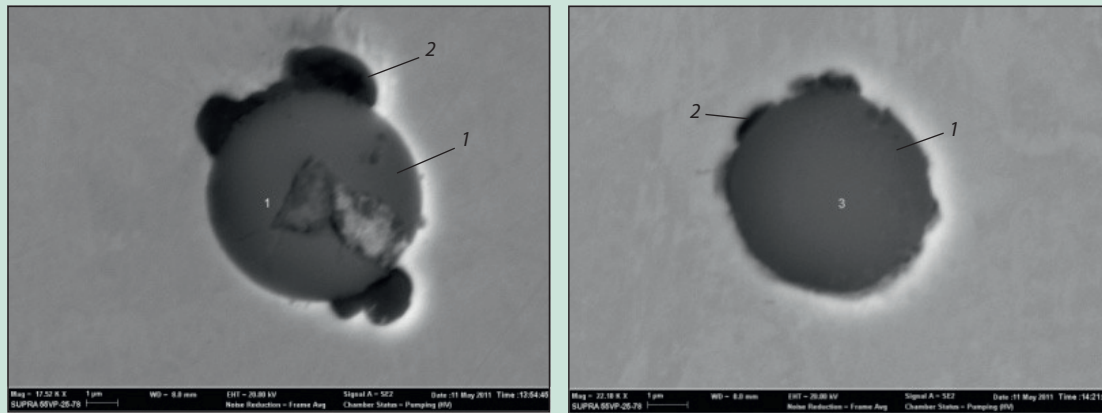


Рис. 4. Многофазные включения, обнаруженные в пробах металла, отобранных в процессе непрерывной разливки: 1 — основа — алюминаты кальция ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$); 2 — оксиды системы $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3$

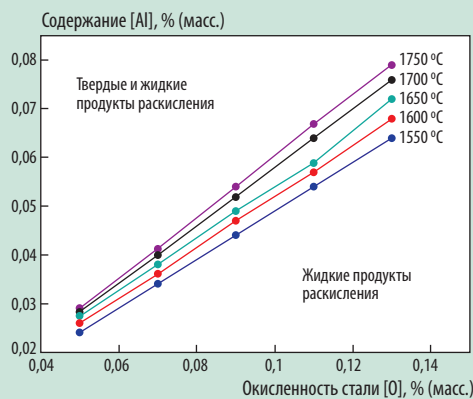


Рис. 5. Зависимость минимального количества алюминия, обеспечивающего образование твердых соединений системы $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3$, от окисленности металла

биалюминаты кальция $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ и магнезиальная шпинель $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, что свидетельствует о значимой роли футеровки при формировании неметаллических включений в процессе внепечной обработки [5].

Микрорентгеноспектральный анализ неметаллических включений, обнаруженных в образцах металла, отобранных из промежуточного ковша и кристаллизатора в процессе непрерывной разливки стали, позволил зафиксировать прирост остроугольных мелких (0,5–2 мкм) нитридных включений. Как правило, эти включения выделяются на подложках оксидных частиц, образовавшихся в стали на более ранних этапах (еще до разливки). Также в некоторых случаях было обнаружено, что на поверхности глобулярных включений системы $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$, сформировавшихся при модифицировании, образуются оксиды системы $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 4). Описанные явления могут быть следствием вторичного окисления жидкого металла при непрерывной разливке.

Кроме вторичного окисления, одной из причин повышения загрязненности металла в процессе разливки

стали может быть попадание в расплав экзогенных неметаллических включений, в частности запутавшихся частиц шлакообразующей смеси (ШОС). Так, в некоторых случаях в пробах металла с разливки были обнаружены скопления крупных экзогенных включений размером более 200 мкм. Низкий уровень металла в кристаллизаторе и остатки частиц ШОС на поверхности кристаллизатора способствуют попаданию шлаковых частиц в металл. Другой причиной попадания частиц ШОС в металл может быть невысокое качество используемых смесей (большое содержание влаги и повышенная гетерогенность смеси).

Сравнительный анализ технологических параметров плавов, характеризующихся различной морфологией и количеством неметаллических включений, позволил выявить критические параметры, оказывающие наиболее значимое влияние на загрязненность стали.

Схема раскисления жидкой стали на выпуске из конвертера является одним из ключевых моментов технологии. Согласно проведенным исследованиям и результатам термодинамического моделирования, основным типом включений, образующихся на данном этапе, являются шлаковые соединения системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MnO-SiO}_2\text{-FeO}$. В зависимости от количества вводимого алюминия совместно с жидкими включениями образуются также твердые соединения корунда Al_2O_3 и герцинита $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Степень удаления герцинита из расплава значительно ниже в виду высокой адгезии к расплаву. Также стоит отметить, что наиболее трудноудаляемые включения $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ образуются в условиях раскисления переокисленного металла алюминием.

Расчетными методами была определена зависимость минимального содержания алюминия в стали, выше которого будет происходить образование твердых включений, от окисленности металла (рис. 5). Полное исключение из схемы раскисления алюминия обеспечивает нейтрализацию образования герцинитных и корундовых включений. При введении алюминия в расплав его количество не должно превышать критическое, определяемое зависимостью на рис. 5.



Немаловажным фактором, определяющим преобладающий тип неметаллических включений, формирующихся при модифицировании стали, является соотношение между содержанием алюминия и кальция в стали. Как было показано ранее [4], согласно результатам термодинамического моделирования, в текущих производственных условиях при обработке стали кальцием равновесным типом включений является биалюминат кальция $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$. Для улучшения морфологии образующихся включений и увеличения степени их удаления из жидкого расплава, требуется повысить количественное отношение вводимого кальция к алюминию.

Также одним из значимых параметров технологии внепечной обработки является интервал времени между присадками алюминия и кальция в расплав. Чем этот интервал больше, тем в большей степени развиваются процессы роста и коагуляции неблагоприятных твердых алюминийсодержащих неметаллических включений. Чем быстрее осуществляется ввод кальция после алюминия, тем быстрее и эффективнее происходят процессы модифицирования имеющихся в металле включений и дальнейшего их удаления. Это объясняется тем, что к моменту ввода силикокальция сердцевина Al_2O_3 не достигает значительных размеров, и тем быстрее осуществляется ее перекристаллизация через жидкую фазу, т. е. время достижения равновесного состава включений снижается [6].

Важное значение для загрязненности стали включениями играет разница между общим временем, прошедшим от момента выпуска металла из конвертера до начала разливки стали $T_{\text{общ}}$ и суммарным временем обработки металла на отдельных стадиях внепечной обработки $T_{\text{обр}}$ — условно время «простоев» ($T_{\text{общ}} - T_{\text{обр}}$), т. е. время, в течение которого осуществлялось взаимодействие футеровки ковша без активного перемешивания расплава. Чем больше время «простоев», тем выше вероятность попадания в расплав экзогенных и эндоэкзогенных магнийсодержащих включений (MgO , $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$).

Как было показано ранее, из-за вторичного окисления загрязненность стали на стадии разливки может значительно возрасти. При этом важными факторами, определяющими защиту струи жидкого металла от воздействия атмосферы, являются интенсивности ее продувки аргоном на промежутках «сталеразливочный ковш — промежуточный ковш» и «промежуточный ковш — кристаллизатор».

Выявление и анализ критических параметров, определяющих загрязненность стали неметаллическими включениями, позволили разработать технологические рекомендации, направленные на оптимизацию технологии. На основе этих рекомендаций сформировали рабочий план по выплавке опытных плавов с использованием различных вариантов внепечной обработки.

В рамках данной работы были опробованы следующие схемы обработки металла на выпуске из конвертера:

- без использования алюминия на выпуске;

- с использованием алюминия, количество которого сокращено в два раза по сравнению с действующей технологией;

- с предварительным раскислением металла марганцем и кремнием перед вводом алюминия;

- с использованием карбида кальция.

Окончательное раскисление стали алюминием проводили по двум технологическим схемам:

- по стандартной заводской методике (без регламентации необходимого временного интервала до ввода кальция);

- ввод алюминия осуществляли не более чем за 10 мин до добавки кальцийсодержащих материалов.

В итоге было регламентировано количество присаживаемых алюминия и кальция на внепечной обработке, скорректированы интенсивности продувки аргоном на непрерывной разливке, выработано ограничение по выдержке стали в ковше [7].

Лучшие результаты по загрязненности стали неметаллическими включениями показали опытные плавки, выполненные по следующим вариантам:

- без использования Al на выпуске, по стандартной заводской методике (без регламентации необходимого временного интервала до ввода кальция);

- с предварительным раскислением металла перед введением Al на выпуске с коротким интервалом между вводом Al и Ca.

Средняя загрязненность проб металла, отобранных из кристаллизатора, составила 0,003 % (об.) по первому варианту и 0,0096 % (об.) по второму варианту, что заметно ниже загрязненности стали, полученной по старой технологии.

Ввиду технологических сложностей, возникающих при использовании первого варианта (неспокойный металл, опасность переливов), было решено провести серию тестовых плавов стали 22ГЮ по второй технологии. В трех сериях было осуществлено 25 тестовых плавов без отклонений от требований рабочего плана. На 128 непрерывнолитых заготовках после пластической деформации определили загрязненность стали неметаллическими включениями. Результаты металлографического анализа показали, что 95 % готового проката имеет загрязненность не более второго балла по ГОСТу 1778-70 (метод Ш6). Таким образом, предложенная технология внепечной обработки трубных марок стали обеспечивает требуемый уровень чистоты металла по неметаллическим включениям. По результатам проведенной работы можно сделать следующие основные выводы.

1. Исследована эволюция неметаллических включений, образующихся при внепечной обработке конвертерной стали трубного сортамента.

2. Определены критические параметры технологии, оказывающие решающее влияние на загрязненность металла неметаллическими включениями.

3. Сформулированы технологические рекомендации, обеспечивающие загрязненность штрипса неметаллическими включениями не более второго балла по ГОСТ 1778-70 (метод Ш6).

ЧМ



Библиографический список

1. Голубцов В. А., Роцин В. Е., Зинченко С. Д., Воронин А. А. Происхождение неметаллических включений и пути снижения загрязненности ими металла // *Металлург.* 2005. № 4. С. 73–77.
2. Bale C. W., Chartrand P., Degterov S. A., Eriksson G., Hack K., Ben Mahfoud R., Melançon J., Pelton A. D., Petersen S. *FactSage Thermochemical Software and Databases* // *Calphad.* 2002. Vol. 26, N. 2. P. 189–228.
3. Дуб А. В., Баруленкова Н. В., Морозова Т. В., Ефимов С. В., Филатов В. Н., Зинченко С. Д., Ламухин А. М. Неметаллические включения в низколегированной трубной стали // *Металлург.* 2004. № 4. С. 67–73.
4. Казаков А. А., Ковалев П. В., Рябошук С. В., Милейковский А. Б., Малахов Н. В. Исследование термовременной природы неметаллических включений с целью повышения металлургического качества высокопрочных трубных сталей // *Черные металлы.* 2009. № 12. С. 5–11.
5. Пирожкова В. П., Яценко М. Ю. Механизм образования включений магнезиальной шпинели // *Сталь.* 2011. № 3. С. 24–27.
6. Yo-ichi Ito. Kinetics of Shape Control of Alumina Inclusions with Calcium Treatment in Line Pipe Steel for Sour Service // *Tetsu-to-Hagane.* 1996. Vol. 93. N. 5. P. 148–150.
7. Martín A., Brandaleze E. Study about downgrading variables by inclusionary cleanliness in the ladle furnace at ternium siderar // *Proceedings of the 7th International Conference on Clean steel.* 2007. P. 203–212.

CONTROL OF NONMETALLIC INCLUSIONS FORMATION DURING CONVERTER STEEL PRODUCTION

Kazakov A. A.¹, Dr. Eng., Prof.

Kovalev P. V.¹, Cand. Eng., Assist. Prof.

Ryaboshuk S. V.¹, Assistant

Zhironkin M. V.², Ladle Treatmet Manager, Steel Competence Center

Krasnov A. V.², Chief Technologist, Steelmaking Production

¹ St. Petersburg State Polytechnic University (St. Petersburg, Russia)

² Severstal JSC (Cherepovets, Russia)

E-mail: kazakov@thixomet.ru

Abstract: Nature of formation and special evolution features of nonmetallic inclusions during ladle refining of converter HSLA steels for pipelines have been studied. Nonmetallic inclusions of the CaO–Al₂O₃–MgO system, close to calcium monoaluminate CaO·Al₂O₃ with up to 5–6% of MgO, have been found as favorable from morphology point of view. These small inclusions nucleate on endogenous MgO substrates at sufficient high content of calcium in steel melt. Hot rolled plates can be rejected due to the coarse calcium bi- and hexa-aluminate inclusions (CaO·2Al₂O₃ and CaO·6Al₂O₃), usually containing exogenous MgO. These coarse inclusions are forming under calcium deficiency conditions, especially in the case of long-time steel holding in a ladle. Critical parameters and technological recommendations providing low level of nonmetallic inclusions in steel have been formulated: calcium/aluminum ratio used for steel deoxidation and modification was increased; interval between additions of calcium and aluminum was decreased; full time of refining was corrected; procedures for lowering of steel reoxidation during

pouring were conducted. Twenty five heats were carried out according to recommendations and the specimens from 128 hot-rolled plates were investigated for evaluation of nonmetallic impurity rating of steel. Metallographic analysis revealed that 95% of finished plates had rate up to 2.0 according to GOST 1778-70 (Sh6 method) standard.

Key words: nonmetallic inclusions, pipeline steel, deoxidation, modification, hot-rolled plates, calcium, aluminum, impurities.

References:

1. Golubtsov V. A., Roshchin V. E., Zinchenko S. D., Voronin A. A. *Metallurg — Metallurgist.* 2005. No. 4. pp. 73–77.
2. Bale C. W., Chartrand P., Degterov S. A., Eriksson G., Hack K., Ben Mahfoud R., Melançon J., Pelton A. D. and Petersen S. *FactSage Thermochemical Software and Databases.* Calphad. 2002. Vol. 26, No. 2. pp. 189–228.
3. Dub A. V., Barulenkova N. V., Morozova T. V., Efimov S. V., Filatov V. N., Zinchenko S. D., Lamukhin A. M. *Metallurg — Metallurgist.* 2004. No. 4. pp. 67–73.
4. Kazakov A. A., Kovalev P. V., Ryaboshuk S. V., Mileykovskiy A. B., Malakhov N. V. *Chernye Metally — Ferrous metals.* 2009. No. 12. pp. 5–11.
5. Pirozhkova V. P., Yatsenko M. Yu. *Stal — Steel in Translation.* 2011. No. 3. pp. 24–27.
6. Yo-ichi Ito. Kinetics of Shape Control of Alumina Inclusions with Calcium Treatment in Line Pipe Steel for Sour Service. *Tetsu-to-Hagane.* 1996. Vol. 93, No. 5. pp. 148–150.
7. Martín A., Brandaleze E. Study about downgrading variables by inclusionary cleanliness in the ladle furnace at ternium siderar. *Proceedings of the 7th International Conference on Clean steel.* 2007. pp. 203–212.