



**Екатеринбург, 16-17 июня 2011г.**

Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения  
с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР

Полученные результаты могут быть также использованы для создания отечественной технологии вдувания пылеугольной смеси в доменные печи, которая заменяет до 30 % кокса, и в мощные дуговые сталеплавильные печи, строительство которых началось в России в последние годы, а также для разработки технологии металлизации железорудных окатышей углем. Этот способ охватывает около 25 % мирового рынка, но отсутствует в России.

#### Список литературы

1. Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пиromеталлургических процессов. Ч. 1 / О.А. Есин, П.В. Гельд, ГНТИ, Свердловск, 1962, 671 с.
2. Лялюк В.П., Шеремет В.А., Кекух А.В. и др. Исследование влияния реакционной способности, прочности и истираемости кокса на показатели работы доменных печей. III Международный конгресс по аглококсо-доменному производству. Ялта, Украина, 2010, с. 50—67.
3. Способ доменной плавки: патент РФ на изобретение № 2176271 от 27.11.01 / Амдур А.М., Брук Л.Б., Загайнов С.А. и др.
4. Способ получения извести: патент РФ на изобретение № 2186042 от 27.07.02 / Амдур А.М., Брук Л.Б., Майер А.А. и др.

### РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ

<sup>a</sup> А.Б. Милейковский, <sup>a</sup> Н.В. Малахов, <sup>b</sup> А.А. Казаков, <sup>b</sup> П.В. Ковалев, <sup>b</sup> С.В. Рябошук

<sup>a</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие

«Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», 195015, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49, e-mail: [victorm@crism.ru](mailto:victorm@crism.ru)

<sup>b</sup> ГОУ «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

В рамках государственного проекта «Магистраль» ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» были созданы и освоены технологии производства сталей для труб большого диаметра морских и наземных трубопроводов категорий прочности от К60 до Х100 с высокими рабочими параметрами для эксплуатации при низких температурах в условиях повышенной сейсмичности.

В связи с тем, что магистральные газо- и нефтепроводы зачастую прокладываются в грунтах с повышенной коррозионной активностью и в морской воде, а также природный газ и нефть, транспортируемые по трубопроводам, содержат в различных концентрациях ионы хлора, углекислый газ и сероводород, вызывающие коррозионные повреждения, металл труб изготавливаемых по проекту «Магистраль» должен был обладать высокой коррозионной стойкостью.

Одним из важнейших факторов, определяющим коррозионную стойкость магистральных газо- и нефтепроводов, является присутствие в стали особого типа неметаллических включений, называемых коррозионно-активными (КАНВ), приводящих к развитию в металле процессов локальной коррозии и ускоренному коррозионному разрушению трубопроводов [1—3]. Эти включения обладают одной особенностью: все они содержат кальций, в основном это сульфиды кальция и алюминаты кальция различного состава, часто с примесями магния и кремния, существенно снижающие коррозионную стойкость стали. КАНВ образуются в стали в процессе внепечной обработки, в результате процессов раскисления и модифицирования и при определенных неоптимальных параметрах технологии внепечной обработки плохо удаляются из расплава и наследуются штрипсом, а в последствие и трубой.

В связи с этим, при производстве трубных сталей, стойких к коррозионным средам, важное значение имеет технология внепечной обработки, в результате которой должен обеспечиваться не только требуемый химический состав стали, низкое содержание вредных примесей и газов, но и низкий уровень загрязненности металла по КАНВ.

Освоение технологии производства трубных сталей по проекту «Магистраль» производилось на ЧерМК ОАО «Северсталь». Конверторный цех ЧерМК оборудован современным металлургическим оборудованием, позволяющим реализовывать различные технологии внепечной обработки.

Принципиально технологическая схема производства качественной стали в конверторном цехе сводится к следующим основным задачам:

- десульфурация чугуна;
- выплавка в кислородном конверторе полупродукта с низким содержанием фосфора, требуемым содержанием углерода и температурой обеспечивающей последующую внепечную обработку;
- наведение шлака, частичное легирование и раскисление на выпуске металла из конвертора в ковш, с отсечением печного шлака;
- усреднение химического состава и температуры при продувке аргоном на установке доводки металла;
- подогрев до температуры вакуумирования и микролегирование на установке «печь-ковш»;
- окончательное легирование и раскисление, дегазация и десульфурация стали, формирование и удаление неметаллических включений на установке вакуумирования стали.

Металлургическое оборудование и технология производства с применением установок десульфурации, раскислением металла, формированием высокоосновного шлака в сочетании с обработкой кальцийсодержащими материалами позволяют осуществлять глубокую десульфурацию стали обеспечивая содержание серы в металле на уровне 0,001—0,003 %. В связи с этим количество КАНВ в металле в виде чистых сульфидов не велико, в то время как образование алюминатов кальция различного состава, зачастую плакированных сульфидами кальция, ввиду особенностей технологии представляется важной проблемой.

Очевидно, что алюминаты кальция, представляют из себя продукты раскисления стали алюминием и модифицирования кальцием, в связи, с чем основное влияние на их образование оказывают количество и последовательность ввода этих элементов.

При выборе технологии внепечной обработки трубных сталей по проекту «Магистраль» рассматривались два основных варианта: стандартная технология с раскислением алюминием на выпуске металла из конвертора в ковш и технология с предварительным вакуум-углеродным раскислением и дораскислением алюминием.

Анализ металлургического качества сталей текущего производства показал, что загрязненность неметаллическими включениями металла, раскисляемого по стандартной технологии алюминием на выпуске, значительно выше, чем выплавляемых с вакуум-углеродным раскислением (см. рис. 1).

Повышенная загрязненность неметаллическими включениями металла плавов с раскислением алюминием на выпуске, прежде всего, связана с тем, что расход алюминия при такой тех-

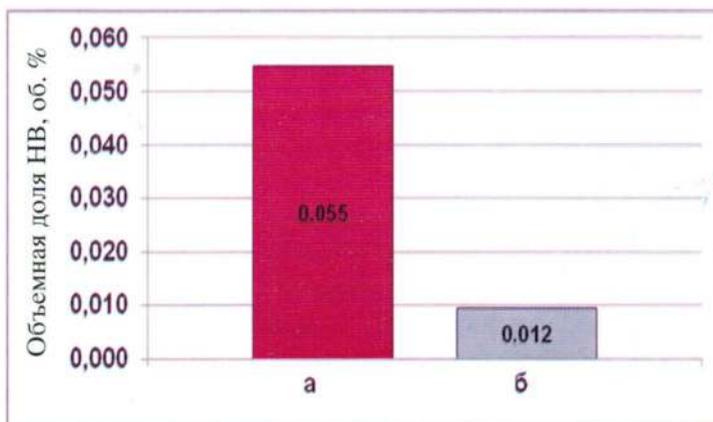


Рис. 1. Загрязненность неметаллическими включениями проб металла отобранных перед разливкой:

а — раскисление алюминием на выпуске (8 плавов стали марки 10Г2ФБ);  
б — вакуум-углеродное раскисление (5 плавов стали категории прочности X80)

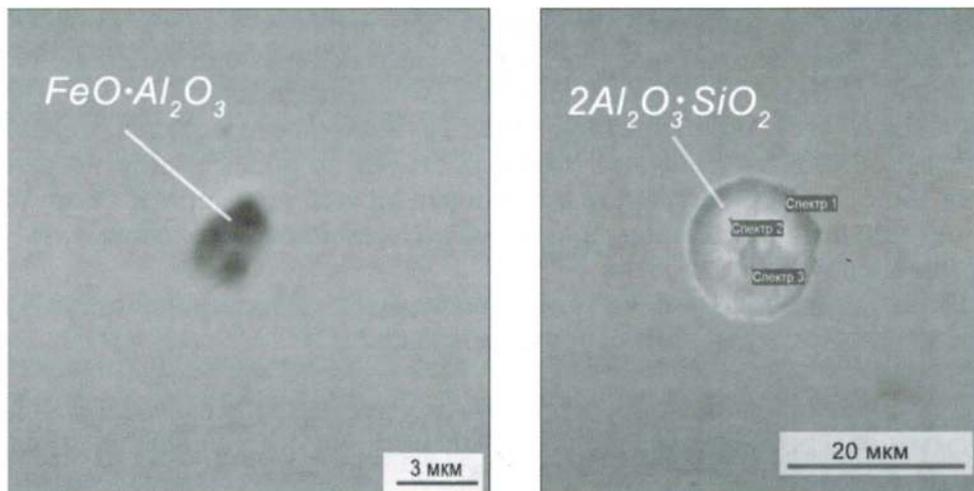


Рис. 2. Включения герценита и муллита в металле после раскисления алюминием на выпуске

нологии в 1,5—2 раза выше, чем при комбинированном раскислении углеродом металла и алюминием при вакуумировании, в связи с чем образуется большее количество продуктов раскисления. Кроме того состав и морфология образующихся неметаллических включений препятствуют их укрупнению и удалению из металла в шлак при внепечной обработке.

При вводе больших порций алюминия в переокисленный металл на выпуске в различных зонах расплава возникают все возможные сочетания концентраций алюминия и кислорода, приводящие к образованию не только включений корунда, но и большого количества включений герценита  $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  [4] обладающих высокой адгезией к расплаву и крайне трудноудаляемых при последующей внепечной обработке. При одновременном вводе в переокисленный металл на выпуске алюминия и кремния образуется не только избыточное количество включений герценита, но и большое количество трудноудаляемых включений муллита  $2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$  (см. рис. 2).

Несмотря на то, что включения герценита и муллита при определенных оптимальных параметрах модифицирующей обработки кальцийсодержащими материалами на заключительном этапе внепечной обработки трансформируются с образованием жидких при температурах сталеплавильных процессов включений алюминатов кальция  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , которые должны легко удаляться из стали в шлак, требуемая степень чистоты металла по коррозионно-активным включениям типа алюминатов кальция не достигается ввиду их значительного количества и недостатка времени необходимого для их укрупнения и удаления из расплава.

В результате в металле штрипса и трубы обнаруживаются КАНВ состава  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , которые, несмотря на благоприятную морфологию не успели удалиться из расплава (см. рис. 3).

Также большие порции кускового алюминия, отдаваемые на выпуске, активно взаимодействуют с футеровкой ковша с образованием магнезиальных шпинелей  $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  [4].

Магнезиальные шпинели, твердые при температурах сталеплавильных процессов, также плохо удаляются в процессе внепечной обработки. На поверхности магнезиальных шпинелей на последующих этапах фазообразования выделяются алюминаты кальция, а на последних этапах затвердевания на поверхности таких многофазных включений, как на подложке, выпадают сульфидные включения. Такого рода конгломераты являются коррозионно-активными и в таком виде часто встречаются в металле штрипса и трубы (см. рис. 4).

Применение технологии вакуум-углеродного раскисления позволяет снизить окисленность металла выпускаемого из конвертора с 700—1000 ppm до 300—500 ppm ввиду отсутствия необходимости окислять металл до заданных содержаний углерода, снизить

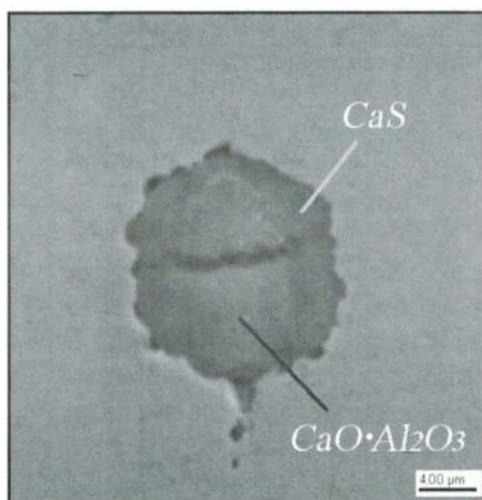


Рис. 3. Многофазное включение на основе моноалюмината кальция, плакированного сульфидом кальция

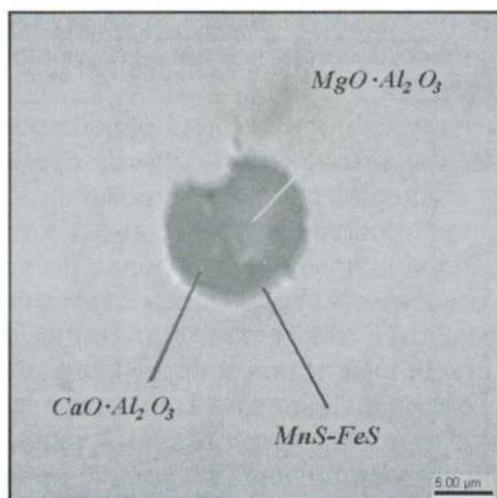


Рис. 4. Многофазное включение на основе магнезиальной шпинели, последовательно плакированной моноалюминатом кальция и затем сульфидной оболочкой

общий расход алюминия на плавку почти в 1,5—2 раза, и соответственно существенно снизить загрязненность металла неметаллическими включениями.

Поэтому при выплавке серии плавок трубных сталей категорий прочности К60, Х70 и Х80 по проекту «Магистраль» была применена технология с вакуум-углеродным раскислением.

Схема присадки материалов по данной технологии представлена на рис. 5.

Присадка основной массы легирующих и шлакообразующих материалов производится в сталеразливочный ковш до выпуска (никель, хром и ферромolibден) и непосредственно во время выпуска (известь, ферромарганец). При этом химический состав стали близкий к заданному обеспечивается уже на первом этапе внепечной обработки, а при дальнейшей обработке производится корректировка химического состава, микролегирование, модифицирование и удаление неметаллических включений.

Необходимо отметить, что температура металла на выпуске из конвертора должна обеспечивать усвоение большой массы загружаемых в сталеразливочный ковш до выпуска и отдаваемых в металл во время впуска ферросплавов, легирующих и шлакообразующих материалов без значительного захлаживания металла, препятствующего укрупнению и удалению образующихся неметаллических включений.

Формирование шлака на стадии выпуска металла из конвертора в ковш осуществляется только присадкой извести, при этом сформированный покровный шлак на начальном этапе внепечной об-



Рис. 5. Схема присадки материалов по технологии внепечной обработки с вакуум-углеродным раскислением

работки в основном является теплоизолятором, а формирование рафинировочного шлака и соответственно все процессы рафинирования перенесены на установку вакуумирования стали.

После выпуска производится обработка на установке доводки металла, где происходит усреднение химического состава и температуры металла, после чего производится нагрев до температуры вакуумирования и микролегирование присадками феррованадия и феррониобия на установке «печь-ковш».

Раскисление алюминием, доводка по химическому составу присадками ферросплавов и легирующих материалов, а также формирование рафинировочного шлака присадками извести и плавикового шпата производится непосредственно в процессе вакуумирования при интенсивном перемешивании аргоном.

При этом важным параметром является температура металла после нагрева на установке «печь-ковш» перед вакуумированием, которая должна обеспечивать температуру после вакуумирования на уровне не ниже 1600 °С. Такая температура обусловлена тем, что, во-первых, при вакуумировании производится присадка марганецсодержащих материалов снижающих температуру металла, а во-вторых, отдача алюминия при такой температуре позволяет сформировать достаточно крупные включения глинозема, легко удаляющиеся из расплава в шлак.

Необходимо отметить важную роль состава рафинировочного шлака в процессе формирования и удаления коррозионно-активных неметаллических включений. Поскольку рафинировочный шлак в основном состоит из CaO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (с примесями MgO, CaF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>), то в процессе интенсивного перемешивания при высокой степени гетерогенности шлака и наличие в нем конденсированных фаз, может происходить эмульгирование в металл неметаллических включений, в том числе и коррозионно-активных алюминатов кальция. В связи с этим, формируемый рафинировочный шлак должен обладать низкой степенью гетерогенности, т. е. не должен быть пересыщен другими фазами в широком интервале температур, и соответственно должен обладать высокой ассимилирующей способностью по отношению к неметаллическим включениям.

Поскольку рафинировочные шлаки в конверторном производстве ЧерМК содержат от 7—10 % MgO, существенно снижающего гетерогенность шлака, состав оптимального рафинировочного шлака должен соответствовать области на диаграмме состояния CaO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—SiO<sub>2</sub> (см. рис. 6).

Обработка металла кальцием для модифицирования сульфидных включений производится присадкой силикокальциевой проволоки на заключительной стадии внепечной обработки. Кальций в металле не только модифицирует сульфидные включения, но и оказывает модифицирующее действие на продукты раскисления металла алюминием с образованием алюминатов кальция различного состава являющихся КАНВ. Как видно из диаграммы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—CaO (см. рис. 7) при разных содержаниях CaO в составе включений могут образовываться алюминаты кальция различного состава, как тугоплавкие CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

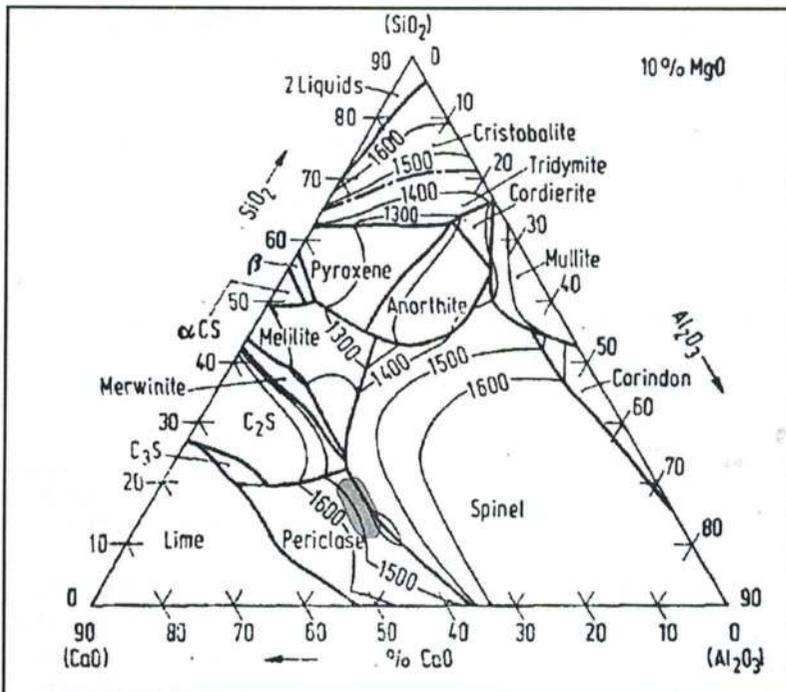


Рис. 6. Диаграмма состояния системы CaO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—SiO<sub>2</sub>—MgO с 10 % MgO [5]

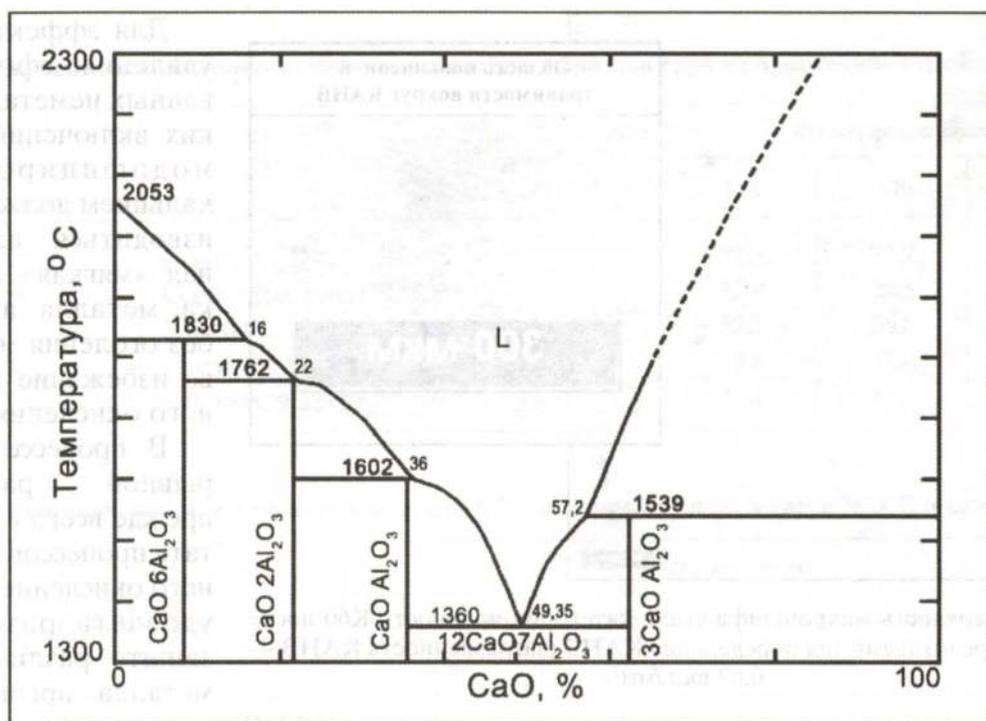


Рис. 7. Диаграмма состояния системы CaO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

CaO·6Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, так и жидкие при температурах сталеплавильных процессов близкие по составу к CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Поэтому для обеспечения чистоты металла по этим включениям необходимо оптимизировать количество вводимого кальцийсодержащего модификатора с целью образования жидких включений, коалесцирующих и удаляющихся из расплава в шлак при последующем перемешивании аргоном.

В трубных сталях требуемое содержание алюминия, как правило, находится в пределах 0,02—0,05 %. Если рассматривать формирование неметаллических включений без участия шлаковой фазы то требуется значительное количество кальцийсодержащего компонента для формирования жидких алюминатов кальция (см. рис. 8).

Поскольку в процессе внепечной обработки происходит активное взаимодействие металла со шлаком, обеспечение высокой основности шлака с отношением CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в шлаке порядка 2,0—2,5 компенсирует требуемое количество кальция, в связи с чем для образования легкоудаляемых жидких алюминатов кальция присадками кальцийсодержащего компонента достаточно поддерживать содержание кальция в стали на уровне 0,003—0,005 %.

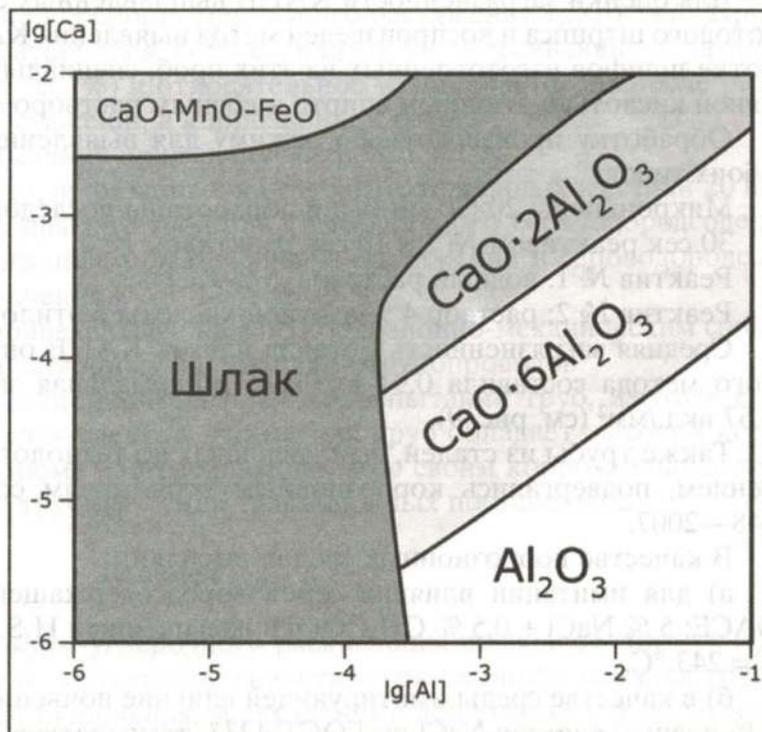


Рис. 8. Поверхность растворимости для стали состава [C] = 0,05 %; [Si] = 0,26 %; [Mn] = 1,56 %; [S] = 0,001 %; температура стали — 1590 °C



Рис. 9. Поверхность микрошлифа стали категории прочности К60 после обработки реактивами для определения КАНВ (загрязненность КАНВ — 0,67 вкл./мм<sup>2</sup>)

тракту разливки, также возможно загрязнение металла КАНВ, но при отработанной и стабильной технологии разливки существенного загрязнения не происходит.

Таким образом, с учетом перечисленных параметров технологии внепечной обработки в рамках проекта «Магистраль» было выплавлено 6 плавок трубных сталей категорий прочности К60, Х70 и Х80.

В работе [2] показано, что критическим уровнем загрязненности КАНВ металла нефте- и газопроводов эксплуатирующихся в коррозионных средах является уровень не более 2 вкл./мм<sup>2</sup>, при увеличении которого существует корреляционная зависимость с увеличением скорости локальной коррозии и снижением срока эксплуатации трубопроводов.

Для оценки загрязненности КАНВ выплавленных сталей были отобраны пробы от готового штрипса и воспроизведен метод выявления КАНВ [6] заключающийся в обработке шлифов изготовленных из этих проб, специальными реактивами: раствором соляной кислоты в этиловом спирте и водным раствором КСl.

Обработку производили по режиму для выявления общей загрязненности КАНВ обоих типов:

Микрошлифы 20×20 мм были обработаны последовательно:

30 сек реактивом № 1 и 10 сек реактивом № 2

Реактив № 1: водный раствор 0,5 % КСl

Реактив № 2: раствор 4 % азотной кислоты в этиловом спирте с 0,1 % КСl

Средняя загрязненность металла плавок КАНВ определенная при помощи указанного метода составила 0,91 вкл./мм<sup>2</sup>. Минимальная загрязненность КАНВ составила 0,67 вкл./мм<sup>2</sup> (см. рис. 9).

Также трубы из сталей, выплавленных по технологии с вакуум-углеродным раскислением, подвергались коррозионным испытаниям согласно СТО Газпром 2—5.1—148—2007.

В качестве коррозионных сред применяли:

а) для имитации влияния сероводородсодержащей среды использовался раствор NACE: 5 % NaCl + 0,5 % CH<sub>3</sub>COOH, насыщенный H<sub>2</sub>S, pH ≤ 3,5, температура раствора T = 243 °C.

б) в качестве среды имитирующей влияние почвенных электролитов использовался 3 % водный раствор NaCl по ГОСТ 4233, температура 22±2 °C.

Как известно, водородное растрескивание вызывается абсорбцией металлом ионизированного водорода, выделяющегося в процессе коррозии металла в наводорожива-

Для эффективного удаления сформированных неметаллических включений после модифицирования кальцием должна производиться длительная «мягкая» продувка металла аргоном без оголения металла, во избежание вторичного окисления.

В процессе непрерывной разливки, прежде всего в результате процессов вторичного окисления при неудовлетворительной защите разливаемого металла аргоном по

Таблица 1

Средние значения коррозионно-механических свойств образцов труб в коррозионной среде и на воздухе

Характеристики	Среда	Категория прочности		
		K60	X70	X80
$\Psi$ , %	воздух	71,3	73,7	68,4
$\Psi_c$ , %	Сероводор. среда NACE	30,0	28,5	28,6
	3 % NaCl	53,7	56,8	55,2
$\delta$ , %	воздух	17,8	17,6	22,1
$\delta_c$ , %	Сероводор. среда NACE	13,7	13,6	13,4

Таблица 2

Средние значения  $\Psi$  и  $\Delta$  образцов из стали X70, экспонированных в среде NACE и на воздухе

Среда	Характеристики			
	Прямошовная труба		Спиралешовная труба	
	$\Psi$ , %	$\Delta$ , %	$\Psi$ , %	$\delta$ , %
Сероводор. среда NACE	22,3	9,3	23,7	9,35
воздух	79,2	18,4	79,2	16,4

ющих средах, с последующим образованием молекулярного водорода в микронесплошностях металла, в том числе и в областях вокруг коррозионно-активных неметаллических включений.

Исследование металла образцов размерами 100×20×30 мм, вырезанных из труб, испытанных на водородное растрескивание в течение 96 ч в среде NACE без приложения к образцам внешних нагрузок, показали отсутствие трещин инициированных водородом.

Испытания на коррозионное растрескивание образцов проводили на машине МР-5-8В в коррозионной среде NACE при скорости медленного растяжения  $7,2 \cdot 10^{-8}$  м/с. Критерием оценки сопротивления материалов коррозионному растрескиванию образцов являлось относительное сужение ( $\Psi_c$ , %) и относительное удлинение ( $\delta_c$ , %) после разрыва образцов при медленном растяжении в коррозионной среде.

Обобщенные результаты испытаний приведены на табл. 1.

Следует отметить, что образцы, вырезанные из труб, изготовленных из стали 20 по ГОСТ 8731/8732 и применяемых для обустройства Оренбургского сероводородсодержащего нефтегазового месторождения, при медленном растяжении в сероводородсодержащей среде NACE имеют значения  $\Psi_c$  от 12 % до 15 %.

В табл. 2 для сопоставления приведены данные по коррозионно-механическим свойствам образцов из стали X70 традиционных поставщиков трубопроводов.

Из приведенных данных коррозионно-механических испытаний труб, изготовленных в рамках проекта «Магистраль» следует, что металл труб обладает высокой коррозионной стойкостью к водородному растрескиванию, а по своим коррозионно-механическим свойствам превосходит трубные стали традиционных поставщиков.

### Выводы

1. Применение технологии вакуум-углеродного раскисления позволяет снизить общий расход алюминия на плавку и существенно снизить загрязненность металла трудноудаляемыми неметаллическими включениями служащими подложкой для образования КАНВ.

2. Раскисление углеродом металла и дораскисление алюминием в вакууме при температурах выше 1600 °С позволяет сформировать крупные легкоудаляемые включения

глинозема, максимально возможное удаление которых необходимо для предотвращения образования КАНВ.

3. Формирование рафинировочного шлака имеющего низкую степень гетерогенности в широком интервале температур обеспечивает эффективное удаление образующихся КАНВ.

4. Обработка кальцийсодержащими материалами с достижением содержания кальция в стали 0,003—0,005 % (при содержании алюминия 0,02—0,05 %) и соотношении  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  в шлаке на уровне 2,0—2,5 позволяет сформировать жидкие при температурах сталеплавильных процессов КАНВ легко удаляющиеся из металла в шлак при последующей продувке металла аргоном.

5. Коррозионные испытания металла труб, выплавленного по технологии внепечной обработки с вакуум-углеродным раскислением, показали высокую стойкость металла к водородному растрескиванию и высокие коррозионно-механические характеристики.

#### Список литературы

1. Филиппов Г.А., Родионова И.Г., Бакланова О.Н., Ламухин А.М., Зинченко С.Д. и др. Коррозионная стойкость стальных трубопроводов // Технология металлов. 2004. № 2. С. 24—27.
2. Родионова И.Г., Бакланова О.Н., Зайцев А.И. О роли неметаллических включений в ускорении процессов локальной коррозии нефтепромысловых трубопроводов из углеродистых и низколегированных сталей // Металлы. 2004. № 5. С. 13—18.
3. Реформатская И., Бейлин Ю., Нисельсон Л., Родионова И. Роль неметаллических включений при коррозии трубных сталей в нефтепромысловых средах // Научно-технический вестник ЮКОС. 2003. № 8. С. 3—6.
4. Милейковский А.Б., Малахов Н.В., Казаков А.А., Ковалев П.В., Рябошук С.В. Неметаллические включения в высокопрочных трубных сталях // Черные металлы. Декабрь 2009. С. 5—11.
5. Атлас шлаков / Пер. с нем. — М.: Металлургия. 1985. С. 80.
6. Пат. 2149400 РФ. Способ контроля качества стальных изделий.

УДК 669.162.263

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ

*А.Н. Дмитриев, Ю.А. Чесноков, Г.Ю. Аржадеева*  
(Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия)

Традиционные способы совершенствования технологии доменной плавки — снижение расхода кокса и повышение производительности — в значительной степени исчерпаны. В их числе наиболее значимые: содержание железа в шихте, использование добавок к дутью (природный газ), нагрев дутья в воздухонагревателях и др.

Наиболее перспективными способами, на наш взгляд, являются использование пылеугольного топлива, повышение качества железорудного сырья и кокса, применение высокопотенциальной теплоты.

Альтернативой использованию природного газа в доменной плавке является пылеугольное топливо (ПУТ), и другой альтернативы пылеугольному топливу в мировой практике нет. Целесообразность перевода доменных печей на пылеугольное топливо обосновывается также дефицитом кокса. Многие металлургические предприятия Азии и Европы работают на пылеугольном топливе. Так в настоящее время в мире более 120 доменных печей работают с использованием ПУТ. Все 30 печей Японии и более половины доменных печей Европы и Китая используют ПУТ как единственный заменитель кокса. Теоретически использование пылеугольного топлива позволит металлургам полностью отказаться от потребления природного газа в доменных печах, заменив его пылеугольным топливом, а природный газ использовать по прямому назначению — в химической промышленности.