

К. т. н. **А. В. Амежнов** (✉)

ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет имени И. П. Бардина», Москва, Россия

УДК 669.14:620.193

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЕМ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ В ВОДНЫХ СРЕДАХ

Проведен анализ литературных данных о технологических принципах управления формированием неметаллических включений в углеродистых и низколегированных сталях для повышения их коррозионной стойкости в водных средах. Обобщены ключевые технологические параметры ковшовой обработки стали, обеспечивающие не только низкую загрязненность неметаллическими включениями, но и формирование неметаллических включений благоприятной морфологии.

Ключевые слова: неметаллические включения (НВ), выплавка стали, внепечная обработка, вакуумирование, непрерывная разливка, коррозионная стойкость, алюмомагнелиевая шпатель, ТКЛР.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что неметаллические включения (НВ) в стали могут как повышать, так и существенно снижать комплекс свойств и служебных характеристик металлопродукции. Как правило, повышенное содержание НВ в углеродистых и низколегированных сталях снижает механические характеристики, хладостойкость, стойкость против локальной коррозии, а при наличии их скоплений приводит к появлению дефектов. В то же время значительная часть НВ, особенно образующихся в твердой стали (выделения избыточных фаз), оказывают положительное влияние на комплекс свойств металлопродукции, повышая ее прочностные свойства.

Изменение технологии обработки жидкой стали в ковше, интенсивное воздействие на расплав инертным газом и кальцийсодержащими материалами, электродуговой подогрев, вакуумирование привели к принципиальному изменению типов НВ, присутствующих в готовой металлопродукции [1, 2]. Они, как правило, имеют сложный химический, фазовый состав и строение, которое полностью определяется типом, последовательностью и режимом проведения операций обработки металла. Влияние на

свойства металлопродукции многих типов таких комплексных образований в основном неизвестно. Ряд исследований показывают, что еще одним их отрицательным свойством является способность ускорять процессы локальной коррозии стали в водных хлорсодержащих средах, которые характерны для нефтепромысловых трубопроводов, тепловых сетей, морских условий и некоторых других видов оборудования [3].

Формирование комплексных НВ в сталях является сложным процессом и происходит по разным механизмам в зависимости от их типа и состава. Как правило, процесс протекает в несколько стадий с последовательным формированием различных фаз [4–6]. При этом образование и трансформация включения могут происходить на различных этапах производства металлопродукции — от выпуска стали из сталеплавильного агрегата до горячей прокатки и термической обработки. Основы формирования НВ и форм присутствия примесей закладываются в сталеплавильном переделе [7, 8].

ЭВОЛЮЦИЯ СОСТАВА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЫПЛАВКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СТАЛЕЙ

Вопросам повышения коррозионной стойкости углеродистых и низколегированных сталей, эксплуатируемых в нейтральных водных средах, уделяется большое внимание. Особенно актуально решение данной проблемы для внутри-



А. В. Амежнов
E-mail: amejnov@mail.ru

промысловых трубопроводов (нефтепроводов и водоводов), транспортирующих высокоминерализованную пластовую воду и механические примеси, что вызывает образование сквозных коррозионных повреждений [9, 10]. Оптимизация химического состава стали, микроструктуры, а также повышение чистоты стали по определенным типам НВ позволяет существенно повысить коррозионную стойкость стали и сроки безаварийной эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов [11–14].

Последние 30 лет основной причиной повышенной аварийности нефтепромысловых трубопроводов являлось повышенное содержание в стали НВ определенного типа на основе алюминатов кальция [9, 15–20]. Такие включения, формирующиеся в процессе обработки жидкой стали в ковше при использовании неоптимальных технологических параметров, были названы коррозионно-активными неметаллическими включениями (КАНВ). Для предупреждения преждевременных коррозионных повреждений трубопровода в нормативные документы на стальную металлопродукцию повышенной стойкости против локальной коррозии было внесено требование — содержание в стали КАНВ не более 2 вкл/мм² площади микрошлифа [9]. Были разработаны технологии производства сталей, чистых по КАНВ [21, 22].

Начиная с 2005–2007 гг. в стали были выявлены КАНВ на основе алюминатов магния (алюмомагниевого шпинели) с сульфидной составляющей (из сульфидов марганца и кальция). Наиболее вероятной причиной этого было изменение состава футеровки ковша, в котором проводили ковшевую обработку стали [23].

В работе [21] показано, что процессы и явления, происходящие при обработке металлического расплава, а также технологические приемы управления типом, количеством, размером и морфологией НВ носят общий характер и не зависят от способа выплавки металла. Определяющей является технология обработки стали в ковше. Разработанная универсальная технология содержит ряд оригинальных приемов обработки металла на выпуске из сталеплавильного агрегата, в сталеразливочном ковше с использованием установок доводки металла (УДМ), установки ковш-печь (УКП) и установки вакуумирования стали (УВС).

Дальнейшее развитие металлургических технологий привело к тому, что НВ на основе алюмомагниевого шпинели в современных сталях имеют более сложный состав [13, 14]. Оксидная составляющая таких включений может содержать Са, Mg, Al и некоторые другие элементы в разных соотношениях. От соотношений содержания таких элементов зависит коррозионная активность включений и, соответственно, коррозионная стойкость сталей. В работе [12] показано,

что коррозионная стойкость современных сталей снижается при их загрязненности НВ на основе алюмомагниевого шпинели при отсутствии Са в оксидной составляющей включения. В работах [24–27] описаны закономерности изменения морфологии включений на основе алюмомагниевого шпинели с целью придания им глобулярной формы, в которой они не являются высокими концентраторами напряжений и не вызывают явно выраженного отрицательного влияния на служебные характеристики металла. Установлено, что одним из способов такого модифицирования является обработка расплава небольшими массами кальцийсодержащих материалов. Согласно [24, 27], для перевода включений в глобулярное состояние достаточным является содержание Са в их оксидной составляющей не более 1 %, хотя такое малое содержание СаО не должно существенно изменять фазовый состав включений на основе алюмомагниевого шпинели и других композиций MgO–Al₂O₃. В работе [12] подтверждено, что с появлением Са в оксидной составляющей включений они принимают более округлую форму. Показано, что содержания во включении Са на уровне 1,5 % достаточно для его модифицирования.

Авторы работы [13] также отмечают, что коррозионная активность комплексных НВ, присутствующих в современных сталях, зависит от их химического состава, оптимизацией которого можно предупредить отрицательное влияние НВ на коррозионную стойкость сталей в условиях эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов. К снижению коррозионной активности комплексных НВ также приводит повышенное содержание в оксидной составляющей включения MgO. К повышению коррозионной активности комплексных НВ и, соответственно, к снижению коррозионной стойкости сталей приводит присутствие в оксидной составляющей включения большого количества корунда. В качестве одного из критериев коррозионной активности комплексных НВ в современных сталях может служить отношение среднего содержания Al к среднему содержанию Mg в оксидной составляющей включения [Al]/[Mg]. При значении указанного отношения менее 1,0 НВ не проявляют коррозионной активности, что позволяет обеспечить высокую коррозионную стойкость сталей для нефтепромысловых трубопроводов.

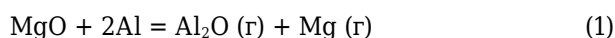
Анализ влияния химического и фазового состава комплексных НВ на их коррозионную активность показал [28], что основной причиной ускорения коррозионных процессов в присутствии НВ определенного состава является изменение напряженно-деформированного состояния матрицы вокруг включений вследствие существенного различия ТКЛР включения и матрицы. Если ТКЛР включения меньше, то при охлаждении металла вокруг неметаллических включений возникает

зона с повышенным уровнем растягивающих напряжений, которые и являются причиной ускорения коррозионных процессов. Комплексные НВ на основе алюмомагниевого шпинели (алюминаты и алюмосиликаты кальция, алюмомагневая шпинель, корунд), ТКЛР которых меньше, чем ферритной матрицы, приводят к повышению их коррозионной активности и, соответственно, к снижению коррозионной стойкости стали. Присутствие в комплексной оксидной составляющей НВ компонентов, имеющих ТКЛР больше, чем у ферритной матрицы (оксиды кальция и магния), приводит к снижению их коррозионной активности и, соответственно, к повышению коррозионной стойкости стали. Положительное влияние на коррозионную стойкость сталей может оказывать и модифицирование НВ титаном, что приводит к ограничению их размеров за счет повышения температуры плавления и затруднению процессов коагуляции [28]. В работе [29] установлено, что при незначительном увеличении содержания титана снижаются размеры НВ (рис. 1), в первую очередь за счет повышения их температуры плавления.

Загрязненность стали НВ определенных типов может приводить к снижению коррозионной стойкости стали. Поэтому при производстве сталей повышенной коррозионной стойкости, эксплуатируемых в водных средах, целесообразно предусмотреть технологические приемы, направленные на формирование НВ благоприятной морфологии.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЗАГРЯЗНЕННОСТЬ СТАЛИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ И НА ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Детальный анализ механизмов формирования КАНВ на основе алюмомагниевого шпинели, влияния на данный процесс технологических параметров ковшой обработки стали представлен в [21]. Формирование магнийсодержащих включений главным образом происходит в сталях, обрабатываемых в ковше при хорошо раскисленном состоянии металла и покровного шлака, когда содержание FeO в шлаке составляет менее 1 %, а в некоторых случаях даже менее 0,5 %. В таких условиях становится возможным интенсивное протекание процесса восстановления магния из футеровки сталеразливочного и промежуточного ковшей, в особенности при высоком содержании в стали алюминия и при использовании обработки силикокальцием. Взаимодействие алюминия, растворенного в металле, с футеровкой осуществляется в соответствии с уравнением реакции:



и приводит к образованию газообразных Mg и сульфидов алюминия Al_2O_3 . Магний, как и все другие

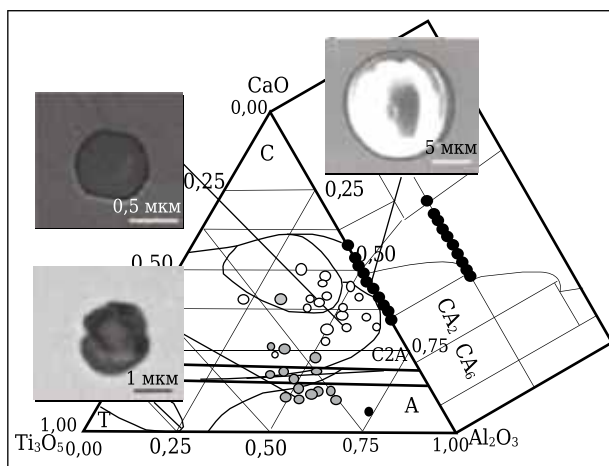


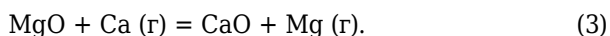
Рис. 1. Влияние содержания оксида титана на размер НВ

щелочноземельные металлы, имеет предельно низкую растворимость в расплавах железа и высокое давление пара при температурах ковшой обработки стали. Образовавшиеся пузырьки паров Mg или самостоятельно, или в объеме пузырьков инертного газа при обработке расплава будут всплывать в объеме металла и при столкновении реагировать с частицами корунда, являющимися продуктами раскисления стали. Взаимодействие будет происходить в соответствии с реакцией комплексного раскисления стали Al и Mg:



Образование газообразного Mg в соответствии с реакцией (1) и его модифицирующее действие на включения корунда (2) могут происходить в течение продолжительного интервала времени, соизмеримого с продолжительностью ковшой обработки стали — десятки и даже сотни минут [21]. При взаимодействии Ca с корундом может происходить формирование жидкоподвижных алюминатных включений, в то время как при модифицировании Mg из-за высокой температуры плавления алюмомагниевого шпинели будут образовываться твердые оксидные включения [30].

По сравнению с Al Ca обладает значительно более высоким восстановительным потенциалом по отношению к MgO:



При контакте паров Ca с периклазовой футеровкой давление пара Mg достигает нескольких сотен атмосфер [31].

Совместное присутствие Al и Ca в стали будет увеличивать восстановительный потенциал металла по отношению к MgO. Снижение концентрации кислорода в металле будет повышать его восстановительный потенциал, стимулируя более интенсивное восстановление Mg из футеровки.

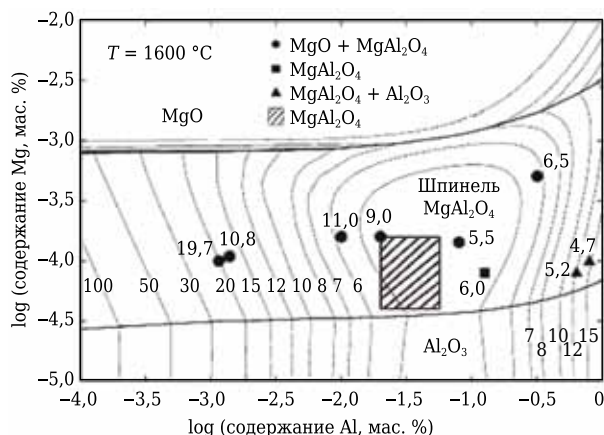


Рис. 2. Диаграмма областей стабильности фаз системы Al-Mg-O [32]

Магний, образующийся в результате протекания рассмотренных реакций восстановления футеровки и растворяющийся в металлическом расплаве, участвует в процессах комплексного раскисления стали Al и Mg. Образование тех или иных продуктов раскисления зависит от концентраций Al и Mg. Обычно при использовании в производстве трубных и ряда других групп марок стали с концентрацией Al 0,02–0,05 мас. % основными продуктами взаимодействия являются алюмомагниево-шпинель и MgO или Al_2O_3 . Для образования шпинели достаточно низких концентраций Mg, менее 1 ppm (10^{-4} %). Это свидетельствует о том, что формирование шпинельных включений может происходить даже в том случае, когда присутствие Mg не может быть зафиксировано по данным химического анализа стали.

Формирование включений алюмомагниево-шпинели может происходить по аналогичному механизму в промежуточном ковше в результате взаимодействия металла с футеровкой и шлаковым покрытием. Интенсивность протекания рассмотренного процесса в значительной степени зависит от качества применяемых материалов футеровки, их пористости и других характеристик. В связи с этим процесс восстановления Mg должен аналогично реализовываться в промежуточном ковше с торкретированной магнетитовой футеровкой.

Включения алюмомагниево-шпинели в непрерывнолитой заготовке характеризуются низкой коррозионной активностью и могут не выявляться как КАНВ. При дальнейших переделах (при нагреве под прокатку или под термическую обработку) на таких включениях возможно образование сульфидной составляющей, что способствует их выявлению как КАНВ в готовом прокате (листах и трубах) [9, 20].

Образованию включений алюмомагниево-шпинели способствует повышение содержания Al и Ca на всех стадиях ковшовой обработки и не-

прерывной разливки стали. Поэтому нецелесообразно присадка их значительных количеств в хорошо раскисленный металл при повышенных температурах с последующей длительной промывочной обработкой аргоном. Для снижения содержания КАНВ на основе алюмомагниево-шпинели продолжительность промывочной обработки следует уменьшать, в то время как для снижения содержания КАНВ на основе алюминатов кальция ее следует увеличивать. Учитывая возможность одновременного образования в стали КАНВ разной природы, очевидно, что должна существовать некоторая оптимальная продолжительность промывочной обработки. При этом обязательным условием ассимиляции рассматриваемых включений шлаковой фазой является существование покровного шлака оптимального состава и гомогенного состояния на всем протяжении ковшовой обработки.

Универсальная технология производства стали повышенной коррозионной стойкости для нефтепромысловых трубопроводов имеет следующие отличительные особенности [21]:

- на выпуске металлического полупродукта из сталеплавильного агрегата в сталеразливочный ковш производится отдача алюминия, извести и плавикового шпата общей массой и в соотношении, которое обеспечивает получение металла с содержанием алюминия не более 0,02–0,03 % и жидкоподвижного шлака, обладающего хорошей электропроводностью в начале обработки стали на У КП. Масса присадки плавикового шпата строго ограничена величиной до 0,5–0,8 кг/т стали;

- масса присадки алюминия до 2,5 кг/т стали рассчитывается с учетом фактических концентраций активного кислорода (окисленности металла) и углерода. Присадка осуществляется порционно, двумя эквивалентными порциями: первая порция отдается на дно ковша перед выпуском металла, вторая — после наполнения 1/2 высоты ковша;

- присадку ферросплавов и лигатур осуществляют из расчета получения среднemarkочного состава;

- в начале обработки на У КП при необходимости производится отдача шлакообразующих ингредиентов (в первую очередь извести) порциями не более 450–500 кг с промежуточной обработкой расплава аргоном. В случае отсутствия возможности получения оптимального соотношения концентраций $(CaO)/(Al_2O_3)$ и необходимого содержания глинозема в покровном шлаке (23–30 %) за счет алюминия, расходуемого на раскисление металла, для повышения концентрации Al_2O_3 присаживают глиноземсодержащие материалы («Рантал», СШУ, ПВА или др.) при отношении их масс к массе присадки извести от 1:1,8 до 1:3 в зависимости от содержания глинозема в материале;

– отдача алюминиевой проволоки производится на завершающей стадии ковшовой обработки при концентрации этого элемента в стали ниже марочной после замера содержания в металле активного кислорода. В случае высокого его содержания (более 30 ppm) отдача алюминия производится с учетом необходимости обеспечения глубокого раскисления. Завершающая корректировка содержания алюминия должна производиться не позднее чем за 5 мин до отдачи кальцийсодержащих материалов;

– обработка расплава кальцийсодержащими материалами (путем отдачи порошковой проволоки с наполнителем из силикокальция или феррокальция марок СК-30, СК-40, FeCa40 или др.) осуществляется не ранее чем через 5 мин после корректировки температуры, отдачи последней присадки на корректировку химического состава стали, при температуре металла не выше 1590–1595 °С. Масса присадки кальцийсодержащих материалов рассчитывается исходя из расхода 20–30 г кальция/т стали при содержании алюминия в металле до 0,015 % и до 60–90 г кальция/т стали при содержании алюминия 0,02–0,04 %;

– обработка расплава аргонном в промывочном режиме после отдачи кальцийсодержащих материалов производится в течение 6–10 мин, при этом расход аргона выбирается таким образом, чтобы не происходило оголение зеркала металла.

Результаты промышленной реализации и опробования технологии свидетельствуют, что она позволяет в несколько раз снизить содержание в стали не только КАНВ, но и других типов НВ, в том числе провоцирующих отсортировку металла по дефектам поверхности и ультразвуковому контролю [21]. При этом критичными являются не только перечисленные особенные требования к технологии, но и использование всех приемов, оказывающих односторонне положительное влияние на обеспечение чистоты стали по всем типам НВ.

При определении оптимальной схемы и конкретных значений ключевых технологических параметров определяющим фактором является не способ выплавки металлического полупродукта, а характеристики используемой установки непрерывной разливки стали (УНРС). Разливка стали на тонкослябовую или сортовой УНРС делает необходимым увеличение расхода кальцийсодержащих материалов до 60–90

г кальция/т стали при содержании алюминия ~0,02–0,03 %. Дополнительное обеспечение эффективной ассимиляции НВ покровным шлаком обуславливает повышенные требования к его составу, состоянию, а также режиму обработки расплава инертным газом и другим параметрам. Это особенно важно, поскольку высокие значения скорости литья заготовок, характерные для тонкослябовых и сортовых УНРС, не позволяют в той же мере обеспечивать рафинирование металла в кристаллизаторе, как при производстве слабов большого сечения.

Разработанные технологии были использованы для производства высококачественной стали в мартеновском цехе ОАО «Тагмет», конвертерном производстве ОАО «Северсталь» и на литейно-прокатном комплексе ОАО «ОМК-сталь» (г. Выкса) при использовании электропечной выплавки.

В связи с быстрым развитием металлургических технологий количество новых типов комплексных НВ в стали постоянно увеличивается, что требует проведения детального исследования условий существования и технологических приемов управления их характеристиками (количество, размер, морфология) для обеспечения максимального повышения комплекса свойств стали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа литературных данных о технологических принципах управления формированием НВ в углеродистых и низколегированных сталях для повышения их коррозионной стойкости в водных средах установлены ключевые технологические параметры ковшовой обработки стали, обеспечивающие не только низкую загрязненность НВ, но и формирование их благоприятной морфологии.

Предложены технологические приемы ковшовой обработки для обеспечения низкой загрязненности стали НВ и их благоприятного химического состава, приводящие к образованию оксидной составляющей включений округлой формы.

В связи с быстрым развитием металлургических технологий количество новых типов комплексных НВ в стали постоянно увеличивается, что требует проведения детальных исследований условий существования и технологических приемов управления их характеристиками (количество, размер, морфология) для обеспечения максимального повышения комплекса свойств стали.

Библиографический список

1. **Родионова, И. Г.** К вопросу о составе и свойствах коррозионно-активных неметаллических включений в трубных сталях, механизмах влияния на коррозию : сб. тр. науч.-практ. семинара «Коррозионно-активные неметаллические включения в углеродистых и низколегированных сталях» / И. Г. Родионова, О. Н. Бакланова, А. И. Зайцев [и др.]. — М. : Металлургиздат, 2005. — С. 15–36.

2. **Зайцев, А. И.** Природа и механизмы образования в стали коррозионно-активных неметаллических включений. Пути обеспечения чистоты стали по этим включениям. : сб. тр. науч.-практ. семинара «Коррозионно-активные неметаллические включения в углеродистых и низколегированных сталях» / А. И. Зайцев, И. Г. Родионова, С. Д. Зинченко [и др.]. — М. : Металлургиздат, 2005. — С. 37–51.

3. **Родионова, И. Г.** Новые подходы к повышению эксплуатационной надежности сталей для нефтепромысловых трубопроводов и возможности их обеспечения при современном уровне развития металлургических технологий : сб. тр. науч.-техн. конф. «Коррозионные марки сталей в трубной промышленности» / И. Г. Родионова, А. И. Зайцев, О. Н. Бакланова [и др.]. — Таганрог, 2009. — С. 2–17.
4. **Holappa, L.** Thermodynamic examination on inclusion modification and precipitation from calcium treatment to solidified steel / L. Holappa, M. Hamalainen, M. Liukkonen, M. Lind // *Ironmaking and Steelmaking*. — 2003. — Vol. 30, № 2. — P. 111–115.
5. **Pires, J. C. S.** Modification of oxide inclusions present in aluminum-alloy steel deoxidized by adding calcium / J. C. S. Pires, A. Garcia // *Metalurgia and Materials*. — 2004. — Vol. 57. — P. 183–189. (<https://paperity.org/p/191224278/modification-of-oxide-inclusions-present-in-aluminum-killed-low-carbon-steel-by-addition>).
6. **Coletti, B.** Observation of calcium aluminate inclusions at interfaces between Ca-treated, Al-killed steels and slags / B. Coletti, S. Vantilt, B. Blanpain, S. Sridhar // *Met. Mater. Trans. B*. — 2003. — Vol. 34B. — P. 533–538.
7. **Зайцев, А. И.** Новые типы неблагоприятных неметаллических включений на основе $MgO-Al_2O_3$ и металлургические факторы, определяющие их содержание в металле. Часть I / А. И. Зайцев, И. Г. Родионова, Г. В. Семернин [и др.] // *Металлург*. — 2011. — № 2. — С. 50–55.
8. **Зайцев, А. И.** Новые типы неблагоприятных неметаллических включений на основе $MgO-Al_2O_3$ и металлургические факторы, определяющие их содержание в металле. Часть II / А. И. Зайцев, И. Г. Родионова, Г. В. Семернин [и др.] // *Металлург*. — 2011. — № 3. — С. 28–33.
9. **Родионова, И. Г.** Современные подходы к повышению коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности сталей для нефтепромысловых трубопроводов / И. Г. Родионова, А. И. Зайцев, О. Н. Бакланова [и др.]. — М. : Металлургиздат, 2012. — 172 с.
10. **Амежнов, А. В.** Особенности и механизмы коррозионного разрушения сталей в различных условиях эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов / А. В. Амежнов // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. — 2019. — № 2. — С. 34–42.
11. **Родионова, И. Г.** Влияние химического состава и параметров микроструктуры на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей / И. Г. Родионова, М. В. Феоктистова, О. Н. Бакланова [и др.] // *Металлург*. — 2017. — № 9. — С. 57–62.
12. **Родионова, И. Г.** Влияние неметаллических включений на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей для нефтепромысловых трубопроводов / И. Г. Родионова, О. Н. Бакланова, А. В. Амежнов [и др.] // *Сталь*. — 2017. — № 10. — С. 41–48.
13. **Амежнов, А. В.** Влияние химического состава неметаллических включений на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей в водных средах, характерных для условий эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов / А. В. Амежнов, И. Г. Родионова, А. И. Зайцев [и др.] // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. — 2018. — № 3. — С. 81–90.
14. **Amezhnov, A. V.** Effect of chemical composition and microstructure parameters on carbon and low-alloy steel corrosion resistance under oil industry pipeline operation conditions / A. V. Amezhnov, I. G. Rodionova, A. I. Batsalev [et al.] // *Metallurgist*. — 2019. — Vol. 62, № 9/10. — P. 1030–1038. DOI: 10.1007/s11015-019-00750-w.
15. **Rodionova, I. G.** The role of nonmetallic inclusions in accelerating the local corrosion of metal products made of plain-carbon and low-alloy steels / I. G. Rodionova, O. N. Baklanova, G. A. Filippov, I. I. Reformatskaya // *Metallurgist*. — 2005. — № 4. — P. 125–130.
16. **Филиппов, Г. А.** Коррозионная стойкость стальных трубопроводов / Г. А. Филиппов, И. Г. Родионова, О. Н. Бакланова [и др.] // *Технология металлов*. — 2004. — № 2. — С. 24–27.
17. **Реформатская, И. И.** Роль неметаллических включений и микроструктуры в процессе локальной коррозии углеродистых и низколегированных сталей / И. И. Реформатская, И. Г. Родионова, Ю. А. Бейлин [и др.] // *Защита металлов*. — 2004. — Т. 40, № 5. — С. 498–504.
18. **Реформатская, И. И.** Роль неметаллических включений при коррозии трубных сталей в нефтепромысловых средах / И. И. Реформатская, Ю. А. Бейлин, Л. Нисельсон, И. Г. Родионова // *Научно-практический вестник ЮКОС*. — 2003. — № 8. — С. 3–6.
19. **Реформатская, И. И.** Оценка стойкости низкоуглеродистых трубных сталей при коррозии в условиях теплотрасс / И. И. Реформатская, А. Н. Подобаев, Г. М. Флорианович, И. И. Ащеулова // *Защита металлов*. — 1999. — Т. 35, № 1. — С. 8–13.
20. **Родионова, И. Г.** К вопросу о составе и свойствах коррозионно-активных неметаллических включений в трубных сталях, механизмах их влияния на коррозию : сб. тр. научно-практического семинара «Коррозионно-активные неметаллические включения в углеродистых и низколегированных сталях» / И. Г. Родионова, О. Н. Бакланова, А. И. Зайцев [и др.]. — М. : Металлургиздат, 2005. — 182 с.
21. **Зайцев, А. И.** Комплексные неметаллические включения и свойства стали / А. И. Зайцев, В. С. Крапошин, И. Г. Родионова [и др.]. — М. : Металлургиздат, 2015. — 276 с.
22. **Zinchenko, S. D.** Development of recommendations on making tube steels produced at the severstal' combine cleaner with respect to corrosion-active nonmetallic inclusions / S. D. Zinchenko, A. M. Lamukhin, M. V. Filatov [et al.] // *Metallurgist*. — 2005. — № 4. — P. 131–137.
23. **Аксельрод, Л. М.** Комплексный подход к вопросу повышения стойкости футеровок сталеразливочных ковшей / Л. М. Аксельрод, Е. М. Сладков, С. А. Дзярский // *Металл и литей Украины*. — 2012. — № 10. — С. 35–39.
24. **Jo, S.** Thermodynamics on the formation of spinel ($MgO-Al_2O_3$) inclusion in liquid iron containing chromium / S. Jo, B. Song, S. Kim // *Met. Mater. Trans. B*. — 2002. — Vol. 33B. — P. 703–709.
25. **Park, J. H.** Formation mechanism of spinel-type inclusions in high-alloyed stainless steel melts / J. H. Park // *Met. Mater. Trans. B*. — 2007. — Vol. 38, № 4. — P. 657–663.
26. **Osio, A. S.** The effect of solidification on the formation and growth of inclusions in low carbon steel welds / A. S.

Osio, S. Liu, D. L. Olson // Material Science Engineering A. — 1996. — Vol. 221. — P. 122–133.

27. **Yang, Sh.** Formation and modification of $MgO-Al_2O_3$ -based inclusions in alloy steels / Sh. Yang, Q. Wang, L. Zhang [et al.] // The Minerals, Metals & Materials. Society and ASM International, 2012. DOI: 10.1007/s11663-012-9663-1.

28. **Амежнов, А. В.** Влияние химического и фазового состава неметаллических включений на коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей в водных средах, характерных для условий эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов / А. В. Амежнов, И. Г. Родионова // Металлург. — 2019. — № 7. — С. 60–67.

29. **Zhang, T.** Effect of Ti content on the characteristics of inclusions in Al-Ti-Ca complex deoxidized steel / T. Zhang, Ch. Liu, J. Qiu, X. Li, M. Jiang // ISIJ International. — 2017. — Vol. 57, № 2. — P. 314–321.

30. **Зайцев, А. И.** Современные проблемы развития металлургических технологий массовых высококачественных сталей / А. И. Зайцев, И. Г. Родионова, Г. В. Семернин [и др.] // Перспективные материалы. — 2011. — № S13. — С. 322–332.

31. **Семернин, Г. В.** Исследование и разработка эффективных технологий ковшовой обработки сталей для труб нефтепромыслового назначения / Г. В. Семернин : дис. ... канд. техн. наук. — МИСиС, 2012. — 156 с.

32. **Jung, In-Ho.** Computer applications of thermodynamic databases to inclusion engineering / In-Ho Jung, S. A. Decterov, A. D. Pelton // ISIJ International. — 2004. — Vol. 44. — P. 527–536. ■

Получено 25.06.19
© А. В. Амежнов, 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



**ЕЖЕГОДНЫЙ ЕВРОПЕЙСКИЙ
КОНГРЕСС И ВЫСТАВКА
ПО ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

**EURO
PM2019**
CONGRESS & EXHIBITION

13–16 октября
2019 г.

г. Маастрихт,
Нидерланды

ТЕМЫ:

- > Функциональные материалы
- > Производство добавок
- > Твердые материалы и алмазный инструмент
- > Горячее изостатическое прессование
- > Литье металла под давлением
- > Новые материалы, процессы и области применения

www.europm2019.com