

**Л.А.Моисеева, Б.П.Моисеев, И.П.Федорова, Л.В.Чуприна**

### **МИКРОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКЗОГЕННЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ. МЕХАНИЗМ И ПРИЧИНЫ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ**

Выполнен анализ причин и механизма образования экзогенных включений разного вида в зависимости от их состава и способа раскисления стали. Указана возможность определения их природы по микрографическим признакам. Установлено подобие состава основного вида экзогенных включений продуктам раскисления..

#### **Постановка задачи**

По условиям эксплуатации железнодорожных колес для оценки качества их металла кроме обычных методов применяют также ультразвуковой контроль для выявления внутренних дефектов, представляющих собой в основном экзогенные (рожденные вне объема стали) макровключения. С усилением жесткости эксплуатации колес повышают требования к чистоте стали по неметаллическим включениям эндогенного и экзогенного типа. В последние годы появились заказы на колеса с уменьшенным почти вдвое допустимым размером внутренних дефектов металла и требованиями по допустимому расстоянию между дефектами проходного размера. При этом повысилась отбраковка колес по макровключениям и возникла проблема с предотвращением их образования. Однако, в отличие от эндогенных включений – оксидов (продуктов раскисления), сульфидов и нитридов, для экзогенных включений еще не выявлена зависимость их содержания в стали от технологических факторов. Это обусловлено очень низким содержанием в стали таких включений, особенно крупных. Так, при ультразвуковом контроле обода железнодорожных колес выявляют лишь единичные включения с сигналом, близким к допустимому уровню либо превышающим его, причем в малой части колес – в среднем менее 0,5% от общего их числа.

Характер случайного присутствия в металле имеют и наиболее мелкие экзогенные включения размером 20–50 мкм, поскольку их выявляют в виде единичных включений в образцах с размером шлифа 15x20 мм при микрографическом исследовании чистоты стали, хотя и во многих образцах из краевой зоны слитков. В отличие от этого эндогенные включения в любом сечении таких образцов насчитываются до ста и более даже в рафинированной стали. В соответствии с количественной разницей проявляется и различие во влиянии на свойства стали этих видов включений. Поэтому особой необходимости в исследовании зависимости чистоты стали по экзогенным включениям от технологических факторов и причин их образования ранее не было.

### **Современное состояние вопроса.**

Просмотр технической литературы [1–5] показал, что объяснения причин и механизма образования экзогенных включений сделаны предположительно, без анализа фактических данных и не соответствуют результатам настоящего исследования. Появление экзогенных включений в стали в основном объясняют также, как это было сделано А.А.Байковым и С.С.Штейнбергом еще в начале XX века. Считают, что посторонние включения появляются в слитках вследствие увлечения потоками стали каплей шлака с ее поверхности в ковше и отслоившихся частиц огнеупорной футеровки ковша, стакана и сифонной проводки. Иногда к экзогенным включениям ошибочно относят поверхностные дефекты слитков в виде внедрений комочков неметаллических материалов в их краевом слое и образования окалина в подкорковых пузырях или трещинах [4].

И в широко известной книге по технологии выплавки стали в мартеновских печах американского общества горняков и металлургов [5] в качестве основной причины образования экзогенных включений указано вымывание потоками стали каплей или комочков оксидной массы из ошлакованного слоя выпускного стакана сталеразливочного ковша, а также из прилегающих к этому стакану участков футеровки ковша и огнеупоров сифонной проводки. При этом к экзогенным включениям ошибочно отнесены также прослойки шлака, затекающего в вершину усадочной раковины слитка, и окалина, возникающая в порах и мелких раковинах в участках усадочной рыхлости, куда не проникает шлак, но имеется сообщение с атмосферой.

В.И.Явойский пытался связать образование экзогенных включений с вторичным окислением стали, вызывающим будто появление переокисленных локальных объемов стали, которые реагируют с футеровкой ковша с образованием крупных включений в стали [3], хотя по экспериментальным данным взаимодействие стали со шлаком и футеровкой ковша, как и с воздухом, приводит к угару сильных раскислителей и повышению содержания в стали кислорода и оксидов эндогенного типа. Такое взаимодействие относят к процессу вторичного окисления стали [3].

### **Методы и результаты исследования.**

Для анализа причин образования экзогенных включений проведено исследование металлографических характеристик и состава более 100 экзогенных включений, выявленных в образцах металла 54 колес разных плавок, большая часть которых проведена с обработкой стали рафинирующим шлаком, вакуумированием и раскислением с помощью алюминовой и Са-содержащей проволоки. Для 8 плавок применяли раскислительные стали сплавами на основе кремния (SiMn, FeSi, SiCa) с добавками FeTi.

Исследование включений проводили после их выявления в темплетах в сечении обода колеса, отмеченном керном при проведении ультразвукового контроля. Для этого образцы с включениями подвергали многократ-

ной ручной шлифовке на наждачном круге со снятием 0,1–0,3 мм в зависимости от размера включений и применением промежуточной полировки до появления неметаллической фазы. Предпочтительней вырезать темплеты с расположением центра зерна на расстоянии 2–3 мм от плоскости их шлифа и после макроконтроля применять выявление макровключений в образцах размером 20x30 мм с керном по центру их 20-мм ребра с последовательным снятием слоя металла по 1 мм и шлифовкой наждачной бумагой до появления включения.

Микрографические исследования показали, что экзогенные включения можно разделить по размеру на крупные длиной более 1мм, в основном в пределах 1,5–4 мм, средние длиной 0,4–1 мм и мелкие макровключения длиной 0,1–0,3 мм. Экзогенные включения размером 0,02–0,09 мм можно оценивать в баллах по шкалам для микровключений типа деформированных и недеформированных силикатов ГОСТ 1778. Поэтому по размеру их можно относить к микровключениям.

Практически все макровключения имеют удлиненную форму. В настоящем исследовании выявлено только 2 овальной формы включения длиной 0,6 и 2,5 мм. Подобное наблюдали и ранее при разной технологии раскисления стали, кроме варианта с применением сплава СКТиА, но при этом наблюдались только мелкие недеформируемые макро- и микровключения экзогенного типа. Удлиненного вида макровключения сильно различаются между собой по форме.

На плавках рафинированной в ковше стали макровключения имеют преимущественно пленочную форму, причем крупные и среднего размера макровключения в основном имеют многослойную, как бы разветвленную с переплетениями пленочную форму. Для них также характерна резко выраженная неравномерность толщины их пленок и более сложная внутренняя структура, чем у включений меньшего размера. В их структуре наблюдаются сравнительно крупные выделения фазы темно-серого цвета, часто с коричневатым оттенком или с переменной окраской поверхности с разводами серого и светло-серого цвета. По результатам микроспектрального анализа эта фаза относится к алюминату кальция и подобна по составу продуктам раскисления рафинированной в ковше стали. Также в них обычно имеются скопления мелких выделений алюмината кальция с прослойками фазы светло-серого цвета, представляющей собой окисел железа типа фаялита  $FeO$ , и неразличимые, но определяемые спектрально мелкие пограничные выделения алюмината магния. В крупных пленочных включениях довольно часто имеются также сравнительно крупные участки фаялита  $FeO$ , иногда они распространяются на большую часть их ветвей (рис.1).

Для мелких и нередко среднего размера пленочных микровключений (характерных для рафинированной в ковше стали) более свойственна не разветвленная, а дугообразная или неправильно изогнутая их форма, но также с резко выраженной неравномерностью их толщины. Они состоят в

основном из выделений алюмината кальция разной прозрачности и переменного состава, что может быть связано с наличием в системе оксидов  $Al_2O_3$ – $CaO$  пяти нерастворимых друг в друге алюминатов кальция и небольшой примеси магния. Иногда они имеют пластинчато–пленочную форму с разветвленностью и монокристалльным видом их пластин, которые состоят из корунда или высоко–глиноземистого алюмината кальция типа А2С и А6С (рис.2).

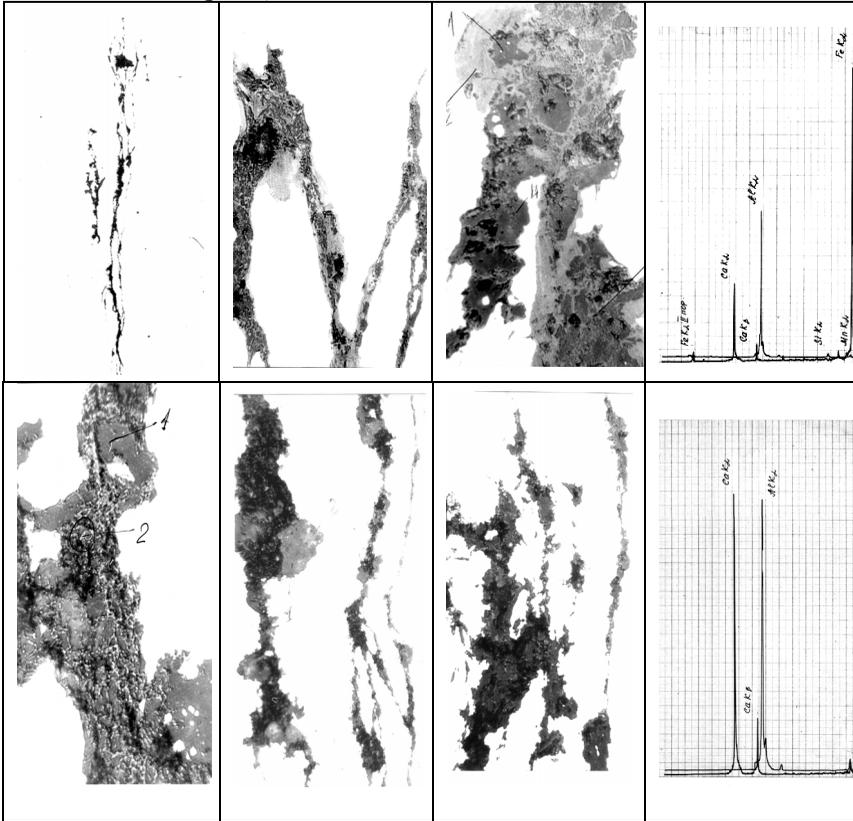


Рис.1. Крупные экзогенные макровключения в стали, рафинированной в ковше. Макровключения пленочной формы разветвленного вида, состоящие из выделений алюмината кальция и закиси железа типа  $FeO$ , а – 50; б–и –  $\times 500$ .

Иногда встречаются мелкие макровключения в виде коротких толстых плен или пластин, состоящих в основном из алюмината кальция. По–видимому, это части крупных плен, либо размытых при разливке, либо находящихся в стадии формирования, поскольку 2 из 4–х выявленных включений такого вида согласованно расположены с другими мелкими экзогенными включениями, образуя ряд дугообразной формы (рис.2). Естественно думать, что такие ряды, а также дугообразные пленочные

включения обозначают границу крупинки металла, вносимых в сталь при разливке вместе с этими включениями.

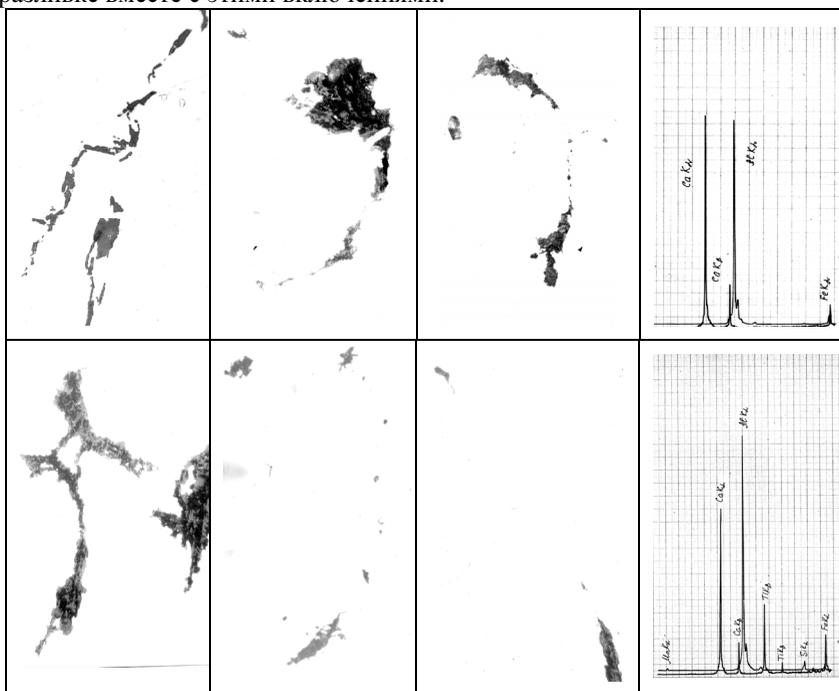


Рис.2. Экзогенные макровключения среднего размера в рафинированной стали. Включения пластинчато-пленочной и прерывисто-дугообразной формы, состоящие в основном из алюмината кальция, а – 500; б–в – x200; д – x100.

Мелкие экзогенные включения типа микровключений в рафинированной в ковше стали имеют большое разнообразие форм. Наблюдаются пленочные включения, глобулярные цельные и неполные с отколом их части – глобулярно-сегментные, иногда с сильными изъятиями, как глобулярно-пленочные и глобулярно-осколочного вида включения. Некоторые из экзогенных микровключений имеют скученно-пластинчатую и неправильную компактную форму (рис.3,е–к).

Почти все экзогенные микровключения в рафинированной в ковше стали, как и макровключения, состоят в основном из алюмината кальция подобно продуктам раскисления. Лишь по их кромке, даже на границе с изъятой частью имеются мелкие выделения алюмината магния и сульфидов, выявляемые микро-спектральным анализом. Круговое по периметру расположение выделений указывает, что включения с изъятиями в таком виде и попадают в сталь.

В 4-х колесах с дефектами в виде затонувших корочек в дефектных участках металла выявлено множество цельных включений достаточно

ровной удлиненной формы, характерной для пластично деформированных включений – без разветвленности, сильной искривленности и без резких перепадов по их толщине (рис.4).

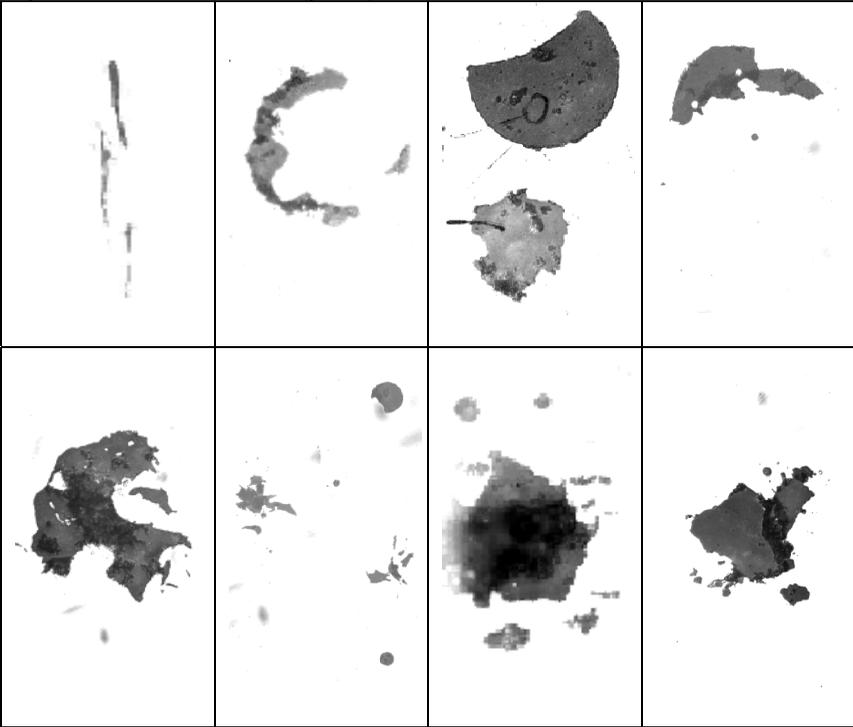


Рис.3. Экзогенные микровключения стали, рафинированной в ковше. Мелко-пленочные, глобулярно-пленочные, глобулярно-сегментные, глобулярно-осколочные, скученно-пластинчатой и неправильной компактной формы включения, состоящие из алюмината кальция., x500.

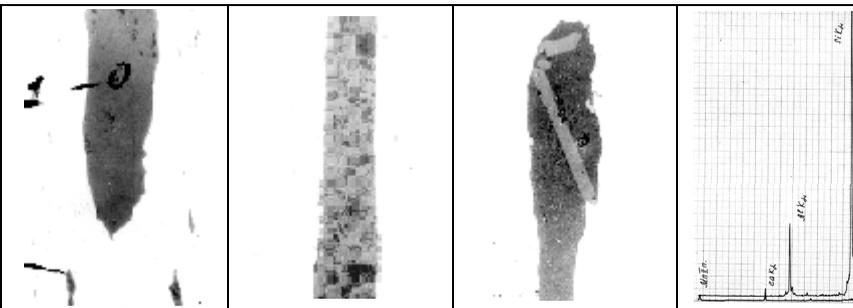


Рис.4. Редкие экзогенные включения стали, рафинированной в ковше. Включения пластично деформированного вида из алюмосиликата, выявленные в участках затонувших корочек, x100.

Для повышения надежности определения природы этих включений по результатам их микро–спектрального анализа такой анализ был сделан и для зольно–графитовой смеси, применяемой для защиты стали в изложницах при разливке, взятой в прессованном и плавленном виде, а также спеченой муровочной массы, применяемой для обмазки сифонной проводки.

Установлено, что все экзогенные включения пластично деформированного вида имеют алюмосиликатную матрицу, но в связи с особенностями их состава в одном колесе они соответствуют шлаку от зольно–графитовой смеси, а в остальных колесах материалу сифонной обмазки, изготавливаемого из песка и огнеупорной глины. Такие включения являются редкими для рафинированной в ковше стали.

Из других редкого вида включений в одном колесе выявлено мелкое макровключение пластинчато–осколочной формы, состав которого подобен материалу шамотной футеровки в ошлакованной части. Оно имеет алюмосиликатную матрицу с кальцием и марганцем, в которой наблюдаются тонко–пластинчатые выделения корунда, а на одном его конце образовалась окалина. По–видимому, это отколовшаяся пластинка ошлакованной шамотной футеровки сифонной проводки (рис.5,а). В 2–х колесах выявлены овальной формы включения диаметром 0,6 и 2,5 мм с составом, соответствующим вышеуказанным алюмосиликатам из шлака от сифонной обмазки (рис.5,б). Еще в 2–х колесах выявлены единичные включения пластично деформированной формы из алюмосиликата, но соответствующего шлаку от зольно–графитовой смеси (рис.5,в).

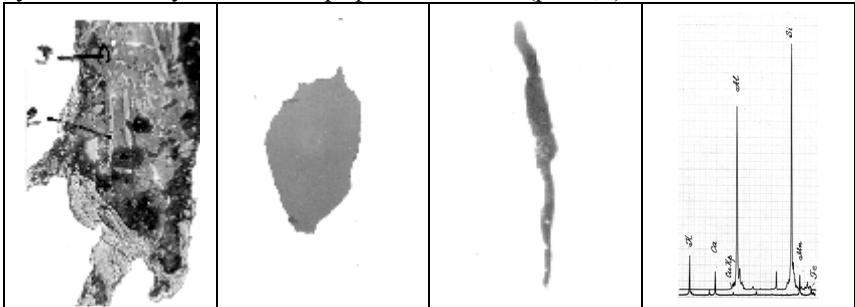


Рис.5. Редкие экзогенные включения стали, рафинированной в ковше. Включения пластинчато–осколочной формы от шамотной футеровки, овальной формы из алюмосиликата, пластично деформированного вида из шлака зольно–графитовой смеси и его спектр, а –  $\times 500$ ; б–в –  $\times 50$ .

Все исследованные включения овальной и пластично деформированной формы имеют высокую прозрачность. В структуре отдельных из них слабо проявляется неоднородность. В одном включении (рис.4,в) имеются выделения алюмината титана пластинчатого вида и оксида титана ком-

пактной формы. Включения из шлака зольно–графитовой смеси (рис.4,а; 5,в) имеют однородную структуру со слабым проявлением в ней тонкой мелкозернистости. Для них также характерна наиболее темная почти черного цвета окраска в светлом поле зрения микроскопа при хорошей их прозрачности.

На плавках, раскисленных с помощью сплава FeSi с добавками SiCa, иногда и FeTi или комплексными сплавами из этих элементов, выявлены экзогенные включения удлиненной формы и достаточно равномерной толщины по их длине. Они подобны по форме пластично деформированным алюмосиликатным включениям, выявленным в рафинированной в ковше стали, и также имеют алюмосиликатную матрицу, но в основном для них характерна более сложная структура с наличием выделений алюминатов кальция и оксидов титана (рис.6). Все экзогенные включения, выявленные в стали с такой технологией раскисления, соответствуют по размеру мелким макровключениям или крупным микровключениям.

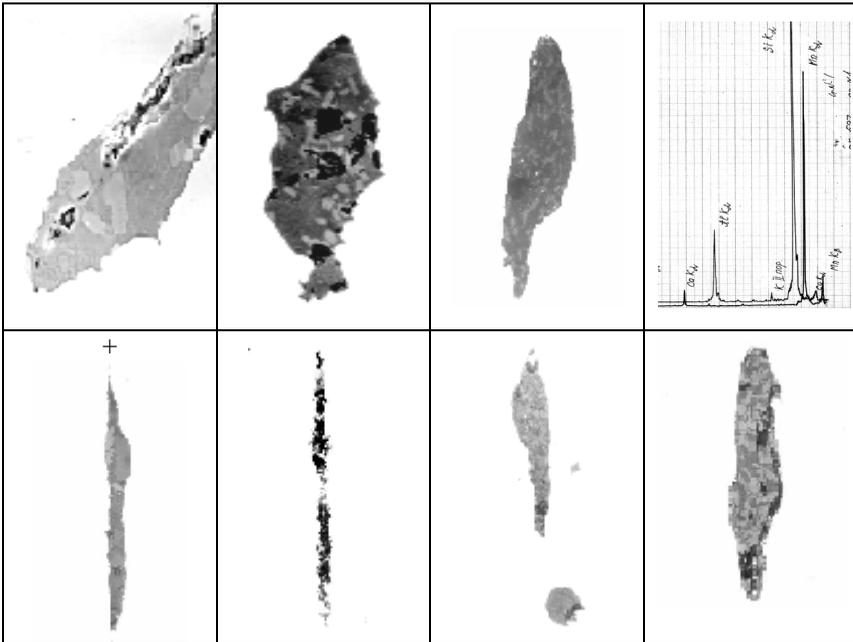


Рис.6. Экзогенные включения в стали, раскисленной кремнием и кальцием или комплексным сплавом на основе этих элементов. Включения пластично деформированного вида, имеющие алюмосиликатную матрицу с выделениями алюмината кальция и титана, х200.

Дополнительно к цельности и вытянуто деформированному виду важным отличительным признаком экзогенных включений силикатного

типа со сложной структурой является также наличие в них силикатной фазы темного, почти черного цвета, имеющей вид матрицы, краевых остатков или прослоек между выделениями кристаллов алюмината кальция и других относительно тугоплавких окислов. В отличие от этого для пленочных экзогенных включений с выделениями алюмината кальция характерно наличие в них прослоек и краевых остатков фазы светло-серого цвета из фаялита FeO, а также их разветвленная, дугообразная или искривленная форма.

Выявленные особенности формы, структуры и состава экзогенных включений позволяют определять их природу без исследования их состава. Также они позволяют сделать анализ причин и механизма образования экзогенных включений. При этом учтены следующие особенности характера загрязненности стали экзогенными включениями.

Прежде всего учтено, что из всех видов экзогенных включений значительно преобладают имеющие состав, соответствующий продуктам раскисления стали. Так, при технологии раскисления, приводящей к получению в стали эндогенных оксидов в виде алюминатов кальция, экзогенные включения также состоят в основном из алюмината кальция и имеют пленочную форму при их размерах более 0,05 мм. В крупных пленочных включениях наблюдаются также выделения оксида железа FeO. Такие включения типичны для рафинируемой в ковше стали с раскислением алюминиевой и Са-содержащей проволокой. При получении продуктов раскисления в виде силикатов или алюмосиликатов и экзогенные включения состоят из таких же оксидов и имеют вид цельных деформированных включений.

Также учтено, что при исследовании состава и структуры большого числа экзогенных включений не обнаружено близких к составу рафинирующего шлака, футеровки ковша и выпускного стакана. Известные данные о значительном влиянии шлака с низкой основностью или высоким содержанием в нем окислов железа и недостаточно стойкой шамотной футеровки ковша на угар сильных раскислителей, состав и количество продуктов раскисления стали наряду с полученными в представляемом исследовании данными о соответствии состава основного вида экзогенных включений продуктам раскисления стали дают основание считать, что влияние взаимодействия стали со шлаком, стаканом и футеровкой ковша на образование экзогенных включений проявляется через его влияние на состав стали.

Отмеченные выше данные позволяют также считать, что механизм образования экзогенных включений путем увлечения шлаковых капель потоками стали в ковше и путем вымывания частей оксидной массы из ошлакованного слоя футеровки ковша, выпускного стакана и сифонной проводки, как предполагают в широко распространенном мнении по данному вопросу [1–5], при разливке в изложницы не проявляет своего действия. Известно, что даже в случае сильного проявления затягивания шла-

ка с получением высокой загрязненности экзогенными включениями, как бывает на радиальных МНЛЗ при значительном снижении уровня стали в проковше или в кристаллизаторе в процессе разливки, такие включения имеют сравнительно небольшие размеры, соответствуя мелким макровключениям и крупным микровключениям.

Процесс затягивания шлака из ковша струей стали протекает и при разливке в изложницы на конечном ее этапе или при разливке сверху под слоем защитной смеси. Однако это не приводит к появлению крупных включений в стали. Также и при разливке сифоном под слоем защитной зольно–графитовой смеси поверхность стали в изложнице не является более местом образования шлако–металлических корочек и крупных оксидных включений, приводящих к появлению экзогенных включений в конусе осаждения в донной части слитка, как было прежде [5]. И сам конус осаждения при такой разливке имеет слабое развитие. Следовательно, имеются другие механизмы образования и появления экзогенных включений в стали, которые еще не были рассмотрены.

Еще учтено, что в связи с происхождением экзогенных включений из внешних источников соответствие состава основного вида экзогенных включений продуктам раскисления стали предполагает наличие оксидных образований такого состава вне объема стали и возможность взаимодействия с ними струи или потоков стали в процессе разливки, как и с другими источниками этих включений.

Источником экзогенных включений подобных по составу продуктам раскисления при сифонной разливке могут быть оксидные пленки, возникающие на поверхности стали в ковше и центровой, и отложения оксидов на слоях стали, затвердевающих по краю выпускного стакана (коллектора) в виде настъли. Только механизм образования экзогенных включений при разливке в изложницы отличается от простого увлечения частиц оксидной пленки в объем стали.

Различие в форме и размерах экзогенных включений пленочного и деформированного вида связано с разной температурой затвердевания оксидных пленок и отложений оксидов, зависящей от технологии раскисления стали. Механизм образования экзогенных включений более понятен при анализе результатов исследования включений пленочного вида. В связи с ожиданием разных механизмов образования включений разного вида, формы и размера уделяли внимание выявлению общих принципов их образования.

По дугообразной форме пленочных включений и рядов мелких экзогенных включений, а также по разветвленности (часто сильной) крупных пленочных включений можно предположить, что образование характерных для рафинированной в ковше стали экзогенных пленочных включений происходит вследствие соединения (сцепления) возникающей на поверхности жидкой стали оксидной пленки с корочками, брызгами или затвердевшими слоями стали и действия на них струи и потоков стали с

внесением комплексов из частиц затвердевшего металла и оксидной пленки разного размера в объем стали. Такие же комплексы образуются и при размывании струей стали настывши с отложениями оксидных пленок, образующейся по краю выпускного стакана.

Форма пленочных включений соответствует форме поверхности слоев металла, на которых отлагаются оксидные пленки. Сохранению этих пленок на поверхности слоев металла способствует их быстрое затвердевание. Такие комплексы бывают многослойными. При внесении в объем стали они сохраняются благодаря наличию в них затвердевших слоев металла и переносу потоками стали к фронту ее затвердевания.

Роль слоев металла в увлечении в сталь частей оксидных пленок известна по опыту сифонной разливки без защиты поверхности стали в изложницах с получением при этом дефектов слитков в виде темных (ошлакованных) корочек и по результатам исследований раскисления стали в изложницах с перемешиванием затвердевающего верха слитка, проведенных в 70-х годах с получением подобных дефектов.

Механизм образования экзогенных включений основного вида в стали, раскисленной кремнием или комплексными сплавами с получением силикатных продуктов раскисления и таких же экзогенных включений подобен рассмотренному выше. Свойственная силикатным экзогенным включениям вытянуто-деформированная форма и более мелкие, чем у пленочных включений, их размеры обусловлены более низкой температурой затвердевания оксидной пленки из силикатов, чем из алюминатов. Благодаря этому она в меньшей степени задерживается на затвердевших слоях стали, особенно при попадании под струю стали, и при внесении в сталь она распадается на капли.

Наличие изъянов в мелких экзогенных включениях основного вида глобулярной и компактной формы размером 0,02–0,05 мм (рис.3) свидетельствует о том, что механизм их образования также подобен механизму образования пленочных включений и связан с возникновением комплексов из частиц оксидной пленки и стали, которые в этом случае имеют вид брызг или крупинок разного размера и состояния.

Глобулярные включения диаметром 0,02–0,03 мм в краевом слое слитков значительно отличаются по размерам в сравнении с остальными включениями и наблюдаются в виде единичных включений в образцах при микрографическом исследовании. Они имеются практически во всех образцах и относятся к типичному характеру загрязненности стали оксидами.

В краевом слое слитка оксиды диаметром 0,02–0,03 мм имеют вид привнесенных включений. Одинаковый максимальный размер таких включений позволяет считать, что их образование связано с дорастанием мелких оксидных включений в зоне снижения температуры жидкой стали к границе ее затвердевания. По данным [4] оксиды диаметром до 3 мкм постоянно присутствуют в некотором количестве в жидкой стали после

удаления более крупных продуктов ее раскисления. Такие оксиды могут быть также внесены струей стали в виде мелких капель из оксидной пленки или возникать в стали вследствие инжекции воздуха, что относится к процессу вторичного окисления стали.

Процесс вторичного окисления состоит в поступлении кислорода в раскисленную сталь с его участием в реакции вторичного раскисления. Этот процесс является фактором, влияющим на получение типичного для принятой технологии производства характера и степени загрязненности стали оксидами эндогенного типа. В отличие от этого образование оксидной пленки на поверхности жидкой стали и окалина на затвердевшем ее слое относится к процессу внешнего окисления стали, являющегося главным фактором в образовании экзогенных включений при разливке стали в изложницы.

Экзогенные включения, соответствующие составу обмазки сифонной проводки, ее шамотных трубок и зольно–графитовой смеси попадают в слиток вследствие перемешивания капель оплавленного слоя или частиц этих материалов с потоками стали, перемещающимися с возможностью быстрого затвердевания и образования плен, корочек или мелких частиц (крупинок) стали с попавшими в них включениями указанных материалов. Такого вида включения наблюдаются очень редко. Большой размер они имели только в участках внесенных в металл крупных корочек стали.

#### **Выводы и перспективы дальнейших поисков.**

Из анализа механизма образования экзогенных включений следует, что главным принципом его действия является возникновение образований из оксидной составляющей и затвердевших слоев или брызг стали, иногда в виде быстро затвердевающих слоев стали, перемешанных с частицами оксидных материалов, при условии действия на эти образования струи или потоков стали.

Внесение неметаллических материалов в сталь в жидком виде без сцепления с корочками, пленами или крупинками стали происходит в виде мелких включений, которые сохраняются в стали при перекрытии путей их всплывания затвердевающим слоем слитка, что характерно для радиальных МНЛЗ. При разливке в изложницы вносимые в сталь подобным образом неметаллические включения в жидком или твердом состоянии практически полностью удаляются в слой шлака на поверхности стали, благодаря всплыванию и переносу конвективными потоками преимущественно еще в процессе разливки стали.

Наиболее явными местами возможного образования комплексов из оксидных пленок и затвердевших слоев или крупинок стали является место возникновения настыли на выпускном стакане и поверхность стали в воронке центральной, особенно при разливке с подпиткой слитка (подкачки стали), выполняемой после наполнения изложниц.

Образование окисленных плен типа микронастылей, по–видимому, возможно также на стенках канала центральной, склонность к которым мо–

жет значительно проявляться при разливке с разрыхленной струей и несоосностью струи с каналом центральной. Плотность струи снижается при ее торможении, связанном с регулированием скорости разливки или с затягиванием выпускного стакана.

Процессы окисления и затвердевания стали, как составляющие механизма образования экзогенных включений, по-видимому могут протекать также на поверхности стали в ковше в связи с ее оголением при очистительной продувке, а также вследствие использования тонкого слоя рафинирующего шлака (толщиной 2–3 см) и неравномерного нанесения изолирующего покрытия или неудовлетворительного его качества. Появление открытых участков поверхности стали при разливке более вероятно у стен ковша в связи с их неровностью, вызывающей задержку шлака. Склонность к появлению оксидных плен и корочек стали при этом возрастает при пониженной температуре разливки стали.

В связи с отмеченными выше особенностями образования экзогенных включений в колесной стали разработаны предложения по предотвращению образования окисленной настыли по торцу выпускного стакана и окисленных корочек на поверхности стали в центральной и ковше, проводится подготовка к их проверке.

1. Червяков А.Н. Металлографическое определение включений в стали. Металлургиздат. 1953, 114 с.
2. Байков А.А. Избранные труды. Metallurgizdat. 1961, 326 с.
3. Явойский В.И. Вторичное окисление как источник экзогенных неметаллических включений. Сталь и неметаллические включения. Тематический отраслевой сборник, №4. М., "Металлургия", 1980, с.18–23.
4. Явойский В.И. и др. Неметаллические включения и свойства стали. М., Metallurgiya, 1980, с. 174.
5. Производство стали в основных мартеновских печах. Второе изд. Общество американских металлургов. Перевод с англ. ГНТИ, 1959, 707 с

*Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. И.Г.Узловым*