



Министерство высшего и среднего специального образования СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

РЕЧКАЛОВА Анна Васильевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ И УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ  
ПРОДУКТОВ РАСКИСЛЕНИЯ СТАЛИ

Специальность 05.16.02 -  
"Металлургия черных металлов"

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
1975

Работа выполнена на кафедре металлургии черных металлов Челябинского политехнического института и на Челябинском металлургическом заводе.

Научные руководители: профессор, доктор технических наук  
Д. Я. Поволоцкий;  
доцент, кандидат технических наук  
В. Е. Рошин.

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук  
В. В. Кряковский;  
кандидат геолого-минералогических наук  
В. А. Зорина.

Ведущее предприятие - Златоустовский металлургический завод.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " мая 1975 г.

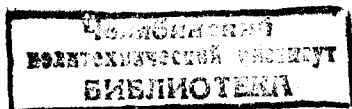
Защита диссертации состоится 11 июня 1975 г., в 15 часов, в аудитории 244 на заседании Ученого Совета металлургического факультета по присуждению ученых степеней при Челябинском политехническом институте.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Адрес института: 454044 г. Челябинск-44, проспект им. В. И. Ленина, 76. Телефон 39-39-64.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета или прислать отзыв (в двух экземплярах, заверенных печатью).

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА  
доцент, кандидат технических наук *В. Н. Гончар* В. Н. ГОНЧАР



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из основных задач черной металлургии в настоящее время является коренное улучшение качества стали, позволяющее резко повысить надежность и увеличить срок службы машин и конструкций. Решение этой проблемы неразрывно связано с уменьшением загрязненности неметаллическими включениями или, в крайнем случае, ослаблением их вредного влияния. Наиболее сильное отрицательное действие на качество стали практически всех марок оказывают окисные включения. Это объясняется как физическими свойствами окислов, так и тем, что они являются самым распространенным типом включений. Они же являются и самым труднодиагностируемым типом включений. Металлургами разрабатывается целый комплекс мер, позволяющих производить металл с более высокими технологическими и служебными свойствами. Суть этих мер заключается в стремлении получить не только минимальное содержание включений, но и сформировать включения с желаемыми свойствами. Получение включений заранее заданной природы невозможно без отчетливого представления момента и механизма их образования, условий формирования включений в том или ином виде, дальнейших их превращений на всех стадиях существования металла в жидком состоянии.

Цель работы. Определить степень влияния состава стали и технологии ее выплавки на характер окисных включений. Выявить основные закономерности образования и превращения продуктов раскисления стали различными раскислителями. Изучить морфологические особенности окисных включений — продуктов раскисления, на основании которых можно предположить происхождение включений в готовой стали.

Методика исследования. Ведущими методами исследования включений в настоящей работе были методы фазового анализа: петрографический для подробного исследования природы включений, рентгеноструктурный и электроноскопический для подтверждения и дополнения результатов кристаллооптического анализа и определения структурных характеристик незнакомых соединений. Использовали также металлографический, микрохимический и микрорентгено-спектральный анализы. Для оптического и рентгеновского микроанализов включения выделяли из металла электролитически локальным и объемным методами.

Научная новизна. Комплексно изучены состав и характерные особенности неметаллической фазы в широком круге марок стали, выплавленных в различных сталеплавильных агрегатах по существенно отличной технологии. Выявлены основные закономерности, определяющие состав, размеры и форму окисных включений в готовой стали. Прослежены процессы трансформации включений при выдержке жидкого металла и при рафинирующем переплаве на установках ЭШП и ВДП. Синтезирован ряд соединений, образующих труднодиагностируемые включения в стали, и изучены их отличительные признаки. На основании результатов экспериментов объяснено происхождение некоторых типов кислородных включений, встречающихся в стали промышленного производства.

Практическая ценность. Результаты данной работы позволяют более обоснованно выбирать сплавы - раскислители и производить операции раскисления стали, сознательно направленные на формирование включений с определенными свойствами (благоприятными для удаления из металла или для ослабления вредного влияния на его технологические и служебные характеристики).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 18 работ и сделано 5 сообщений на научно-технических конференциях.

Объем работы. Диссертация состоит из четырех глав, изложенных на 136 страницах машинописного текста; содержит 57 рисунков, 6 таблиц и 249 наименований использованной литературы.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ литературных данных, который позволяет заключить, что основная масса включений в готовой стали имеет эндогенное происхождение и представляет собой продукты раскисления и окислительно-восстановительных реакций, протекающих на всех этапах производства стали. Использование разных раскислителей или композиций раскислителей для раскисления разных по химическому составу стали, выплавляемых в различных сталеплавильных агрегатах по существенно отличающейся технологии, позволяет предполагать образование многих типов продуктов раскисления, состав которых определяется системами раскислитель-кислород и закись железа-окисел раскислителя.

В последнее время широкое применение получили методы рафинирующего переплава стали на установках ЭШП и в вакуумных дуговых печах, внепечное рафинирование металла синтетическим шлаком, внедряется электрошлаковая разливка стали, осваивается производство ряда легированных марок стали в кислородных конвертерах. При внедрении новых способов получения стали изучают, как правило, влияние технологии на количество неметаллических включений. Качественные изменения, которые также могут играть существенную роль, изучены недостаточно. Остаются неясными причины появления одних и тех же окисных включений различной формы даже при выплавке стали по одной и той же технологии. Не изучены процессы формирования включений разных типов и их последующие изменения в жидком металле.

Противоречивы мнения об источнике загрязнения неметаллическими включениями переплавленного металла. Одни исследователи полагают, что включения перешли из исходного металла и по тем или иным причинам не удалились в процессе переплава, другие считают, что все включения образовались в период кристаллизации.

Накоплен значительный фактический материал об эффективности применения редкоземельных металлов при производстве качественных сталей. Описаны включения, встречающиеся в металле, обогащенном РЗМ. Но природа продуктов раскисления стали редкоземельными металлами остается невыясненной, что обусловлено трудностью диагностики кислородных соединений РЗМ вследствие их низкой химической стойкости, отсутствия надежных справочных данных по оптическим и физико-химическим свойствам, сходства внешних признаков и некоторых свойств с сульфидными соединениями РЗМ.

Во второй главе приведены результаты исследования продуктов раскисления в промышленных сталях. При исследовании ставились следующие задачи: 1) изучить зависимость природы окисных неметаллических включений от марки стали, способа ее получения и технологии выплавки и раскисления, 2) определить степень участия легирующих и модифицирующих элементов в формировании окисной фазы, 3) предположить момент появления и процессы трансформации включений в жидком металле.

В соответствии с поставленными задачами природу окисных включений изучали в стали углеродистых и низколегированных

марок - Экп, Юкп, Эпс, Юпс, Эсп, Юсп и ЗСГС, выплавленных в 125-тонном кислородном конвертере, в шарикоподшипниковой стали ШХ15, выплавленной в открытой 40-тонной электропечи, а также в 100-тонных печах с последующей обработкой в ковше жидким синтетическим шлаком; в нержавеющей стали марок 000Х18Н12, Х17Н2, Х18Н10Г, 0Х18Г1, полученных в разных агрегатах: в 150 и 500-килограммовых индукционных печах, 40-тонной дуговой электропечи, а также переплавленной на установке электрошлакового переплава. Влияние редкоземельных элементов на природу окисных включений изучали в нержавеющей стали марок 0Х17Г1, 0Х22Н5Г1, Х18Н10Г, 0Х17Н16М2Г1, выплавленных в 10-тонных дуговых электропечах и в опытных плавках стали 000Х18Н12, проведенных в 0,5-тонной вакуумной индукционной печи.

Влияние вакуумного дугового переплава на неметаллические включения наблюдали в конструкционной стали марок 20, НК, 12Х2Н4А, 30ХГСА, 15ХСМФБ, 40ХЗСНМФ, 42Х2ГСНМА, выплавленных в 40-тонных открытых электропечах, а также в низкоуглеродистом (НК) и высокоуглеродистом (ВУ) железе, выплавленном в 5-тонных печах и переплавленном на установках ВДП в вакууме или в атмосфере аргона.

Для выяснения происхождения окисных включений в электрошлаковом металле исследовали характер неметаллической фазы до и после переплава некоторых сталей текущего производства. Стали 18Х2Н4ВА и Х18Н10Г для расходуемых электродов выплавливали в открытых дуговых печах, а сталь 20ХНЗА - в маргеновской печи с окончательным раскислением алюминием в ковше.

Стали 18Х2Н4ВА и 20ХНЗА переплавливали под флюсом АНФ-6. Сталь Х18Н10Г переплавливали под шлаком состава 30%  $Al_2O_3$ , 20%  $CaF_2$ , 25%  $CaO$ , 25%  $TiO_2$ . В процессе переплава шлак раскисляли сначала алюминиевой пудрой, затем смесью из 60% двуокиси титана и 40% алюминиевого порошка. Для сравнения под флюсом АНФ-6 переплавливали технически чистое железо, раскисленное при выплавке в 5-тонных печах только алюминием или только кремнием. Дополнительные сведения о возможности запузыривания шлака в металле, взаимодействии шлака с имеющимися в стали включениями и влиянии его на условия кристаллизации включений были получены при исследовании неметаллической фазы в стали ряда марок (ШХ15, 18Х2Н4ВА, ЗВХМГА, Х18Н10Г, 2Х13), полученных методом электрошлаковой разливки.

Анализ неметаллических включений в конвертерной стали показал, что состав включений в металле по ходу выплавки меняется в зависимости от технологии раскисления. Однако состав включений в готовой стали определяется окончательным раскислением и процессами, протекающими в кристаллизующемся слитке.

В шарикоподшипниковой стали изучали происхождение крупных глобулярных включений в металле, выплавленном по обычной технологии и по технологии ЦНИИЧМ с обработкой в ковше известково-глиноземистым шлаком. Проведенное исследование позволило проследить изменения природы глобулярных неметаллических включений по ходу выплавки и разливки стали, а также оценить роль каждой стадии раскисления металла в этих изменениях.

В печных пробах прямая зависимость состава включений от типа раскислителя и режима раскисления очевидна и сомнений не вызывает. В процессе обработки в ковше жидким синтетическим шлаком металл загрязняется каплями этого шлака. Однако присадка раскислителя изменяет состав капель эмульгированного в металле синтетического шлака. Кроме того, возможно частичное попадание в ковш печного шлака. Поэтому часть капель синтетического шлака обогащается окислами алюминия, кремния и магния. Резкое снижение в разливочных пробах числа глобулей, характерных для ковшевых проб, свидетельствует об удалении глобулярных включений во время выдержки в ковше. Часть шлаковых включений остается в металле и наблюдается в готовой стали в таком же или более раскристаллизованном виде. Загрязнение готовой стали крупными глобулярными неметаллическими включениями следует связывать как с запутыванием капель шлака и продуктов раскисления стали в печи и ковше, так и с переходом в металл элементов-раскислителей, а также кальция и магния из шлака. При этом остаточные концентрации этих элементов оказывают решающее влияние на минералогический состав образующихся при кристаллизации слитка включений.

Изучение состава и морфологии окисных включений в нержавеющих сталях разных марок показало, что природа включений определяется как типом раскислителя и технологией раскисления, так и участием в этом процессе легирующих элементов.

Положительное влияние добавок редкоземельных металлов на сталях промышленной выплавки не связано с изменением состава окислородных включений, так как присадка редкоземельных металлов обычно производится в недостаточных для заметного изменения состава окисной фазы количествах.

Итак, анализ кислородных включений в промышленном металле показывает, что состав включений в стальном слитке определяется режимом раскисления и типом применяемого раскислителя. В случае легированных сталей в процессе раскисления могут принимать участие легирующие элементы (титан, хром). При этом возможно образование низших окислов этих элементов ( $Ti_2O_3$ ;  $Cr_2O$ ). Модифицирующие добавки редкоземельных элементов также изменяют природу кислородных включений.

Включения в готовой стали чаще всего являются продуктами окончательного раскисления и процессов, протекающих в кристаллизующемся слитке, и по своей природе тем ближе включениям в литой стали, чем позднее производилась операция окончательного раскисления. Раскисление шарикоподшипниковой стали и некоторых простых марок стали конверторного производства по различным опытным вариантам показало, что нередко включения в катаной стали по своему характеру мало сопоставимы с включениями в пробах металла, отобранных из печи, ковша и в период разливки. Определение происхождения таких включений невозможно без отчетливого представления механизма их зарождения, условий формирования и роста, а также изменений в процессе выдержки металла в жидком состоянии.

Изучение поведения окисных включений при переплаве стали на установках ВДП показало, что включения могут переходить из исходного в переплавленный металл. Наряду с этим после переплава в стали появляются новые включения. Морфологические особенности некоторых из них позволяют предположить, что они образовались в результате перерождения (перекристаллизации или полиморфных превращений) уже имевшихся в металле окисных фаз (дендриты шпинели,  $\alpha$  - кварц,  $\beta$  - кристобалит). Происхождение других включений осталось неясным ( $\beta$  - глинозем и шпинель в металле, в который алюминий не присаживался).

Проведенное исследование позволило проследить при переплаве стали изменения, происходящие с продуктами раскисления разного состава и формы. Однако этого оказалось недостаточно для объяснения механизма и условий формирования разных типов включений, образующихся при раскислении металла даже одним раскислителем.

Окисные включения в металле, переплавленном на установке ЭШП, характеризуются отсутствием признаков наследственной связи



включений исходного и переплавленного металла, формированием новых включений, появлением фазы со структурой шпинели ( $N \sim 1,737$  и  $\alpha = 8,08 - 8,11 \text{ \AA}$ ). Выяснить точный состав и условия образования шпинели в рамках исследования промышленного металла не представилось возможным. Результаты исследования не позволили также выявить влияние флюса на состав окисных включений. Однако изучение включений в металле электрошлаковой разливки показывает возможность взаимодействия включений со шлаком, сопровождающееся образованием новых химических соединений.

По форме встречающиеся в сталях промышленной выплавки эндогенные включения можно разделить на четыре основные группы: округлые зерна, полиэдрические кристаллы с четко выраженными гранями, дендриты и глобули.

Для определения условий формирования каждого вида включений а также изучения их превращений в процессе выдержки металла в жидком состоянии были поставлены специальные лабораторные эксперименты.

В третьей главе изложены результаты исследования механизма образования и превращения продуктов раскисления.

Формирование неметаллических включений в процессе раскисления металла происходит в неодинаковых условиях. Движение расплава, окисление его воздухом, различные концентрации кислорода и раскислителя в момент присадки раскислителя и спустя некоторое время приводят к образованию включений различного типа. При выравнивании концентрации раскислителя по объему металла в разных местах жидкой ванны может наблюдаться различный механизм питания растущих зародышей, взаимодействие уже образовавшихся включений с раскислителем, что должно отразиться на их размерах, форме и составе.

В готовом металле или пробах, отбираемых по ходу раскисления, невозможно выявить механизм формирования и изменения включений в различных концентрационных условиях, поскольку эти различия существуют в микрообъемах, а отобранные пробы характеризуют средние условия в значительных объемах металла. В большой массе металла трудно в течение заметного времени поддерживать условия, обеспечивающие образование включений определенного типа.

Для выяснения условий формирования разных по размеру, форме и составу включений, образующихся при раскислении стали одним и тем же раскислителем, использована методика диффузионного раскисления технического железа в узких капиллярах, позволяющая получать в одном небольшом образце набор изменяющихся концентраций раскислителя и кислорода и моделировать условия, которые возникают при введении раскислителя в расплав стали.

Для проведения опытов использовали созданную на базе печи сопротивления с графитовым нагревателем вакуумную установку, позволяющую устранить причины конвективного движения металла в опытном образце. Опыты проводили в нейтральной атмосфере одновременно в двух алундовых пробирках, погруженных в расплавленное железо, температура которого поддерживалась на уровне  $1600 \pm 10^\circ\text{C}$ . После выравнивания температуры внутри и снаружи пробирок к поверхности реакционного железа, содержащего примерно 0,1-0,2% кислорода, подвели раскислитель. Плоскость контакта фиксировали. Через определенное время пробирки извлекали из металла и закаливали в струе аргона. На микрошлифах, приготовленных из опытных образцов, изучали продукты раскисления железа алюминием, кремнием, сплавами алюминия с кремнием и марганцем, а также продукты раскисления цирконием, титаном, церием и лантаном.

Для фазового анализа неустойчивых лантансодержащих включений применяли метод "сухого" препарирования, заключающийся в ионном травлении в вакуумной камере поверхности свежеприготовленного шлифа. После травления образовавшийся микрорельеф выступающих неметаллических включений изучали на отраженном электронном микроскопе.

Трансформацию включений и влияние флюса на природу продуктов раскисления наблюдали при переплаве стали 10 на лабораторных установках ЭШП под флюсами АНФ-6, АНФ-7 и АНФ-9.

Изучение формы включений и их расположения в опытных диффузионных образцах позволило описать механизм образования разных включений при раскислении стали одним и тем же раскислителем.

При попадании раскислителя на поверхность кислородсодержащего железа в плоскости контакта возникает значительное пересыщение раствора раскислителем и кислородом, в результате чего образуется большое количество зародышей. На их рост расходуется кислород близлежащих слоев железа. Одновременный рост большого числа включений приводит к образованию множества мелких кристаллов, дальнейший рост которых невозможен из-за недостатка кислорода. Вследствие значительно большего градиента концентраций раскислителя скорость диффузии его превышает скорость диффузии кислорода. Раскислитель быстро проходит зону, ниже которой встречает диффундирующий в противоположном направлении кислород. В условиях встречной диффузии образуется зона дендритных включений, причем соотношение скоростей диффузии раскислителя и кислорода определяет направление роста дендритов, плотность их расположения и степень развития осей второго порядка. С течением времени установившееся равновесие нарушается, так как на образование включений расходуется кислород все более далеких слоев железа и скорость подвода кислорода уменьшается. Вследствие этого кислорода становится недостаточно для образования и роста дендритов, раскислитель проходит дальше, и слой дендритных включений обрывается. Незначительное количество кислорода, подходящее из далеких слоев железа, расходуется на образование отдельных включений, и так как рост включений возможен при значительно меньшем пересыщении, чем образование нового зародыша, включения в этих условиях вырастают до значительных размеров. И, наконец, там, где концентрация кислорода уменьшилась незначительно и раскислитель содержится в небольшом количестве, выделяются едкие продукты раскисления, содержащие закись железа.

Результаты опытов по раскислению железа цирконием позволили уточнить условия формирования некоторых типов включений, в частности, дендритных. Если на основании результатов раскисления алюминием можно было бы сделать вывод о необходимости для образования дендритов встречной диффузии раскислителя и кислорода, скорость подвода которых обеспечивала бы концентрации компонентов, достаточные для образования чистого окисла раскислителя, то результаты раскисления цирконием показывают, что это условие не обязательно.

Для формирования дендритов, по-видимому, достаточно встречной диффузии реагентов со скоростями, обеспечивающими выделение продуктов раскисления в твердом виде.

Раскисление титаном показало, что если раскислитель имеет несколько окислов, то образовавшиеся высшие окислы по мере роста концентрации раскислителя в металле восстанавливаются до низших. При этом дендриты могут быть получены любого состава, если условия диффузии обеспечивают выделение твердых продуктов раскисления. Образование жидких продуктов раскисления также возможно при раскислении любым раскислителем, если для этого созданы необходимые концентрационные условия.

Присутствие кремния и марганца в сплавах с более сильными раскислителями не вызывает принципиальных изменений в механизме образования продуктов раскисления, но расширяет область существования легкоплавких включений.

Таким образом, при раскислении любым раскислителем спонтанно выделяются продукты реакции такого состава, относительно которого в данный момент и в данном локальном объеме достигнута необходимая степень пересыщения.

Процесс образования продуктов раскисления железа церием и лантаном подчиняется общим закономерностям, но имеет свои особенности. К ним следует отнести слабое развитие дендритных включений, выделение значительной части продуктов в жидком виде, сильно выраженную склонность к коагуляции.

В процессе экспериментов получены достаточно чистые окисные соединения церия и лантана, изучены их свойства, уточнены оптические константы фаз  $La_2O_3$ ,  $Ce_2O_3$ ,  $CeO_2$ .

Ввиду близости кристаллохимических и оптических свойств окислов и сульфидов РЗМ, а также отсутствия исчерпывающих справочных данных о них было целесообразно уточнить, а в некоторых случаях определить кристаллооптические константы сульфидных соединений РЗМ для более уверенной их идентификации и отличия от окисных соединений.

Синтезированы достаточно чистые сульфидные соединения церия и лантана в железе. Изучены оптические свойства включений, образованных фазами  $Ce_2S_3$ ,  $CeS$ ,  $La_2S_3$ ,  $LaS$ .

В опытах с диффузионным поступлением раскислителя в кислородосодержащее железо по мере повышения концентрации раскислителя в расплаве наблюдали восстановление образовавшихся окислов высшей валентности до низших окислов (закись титана, субокись алюминия). Кроме того, при электрошлаковом переплаве стали неоднократно обнаруживали шпинельную фазу, состав которой точно не установили, но предположили, что она является собственной глиноземной шпинелью ( $Al_2O_3 \cdot Al_2O_3$ ). Небольшое количество и малые размеры включений не позволили провести их всестороннее изучение. Восстановление окислов кремнием приводило к исчезновению включений и образованию на их месте газовых пор. Было высказано предположение, что конечным продуктом восстановления включений кремнием была моноокись кремния, обладающая высокой упругостью пара и поэтому находящаяся в жидком металле в газообразном состоянии. Но попытки найти конденсат монооксида на стенках пор оказались безуспешными.

Была поставлена задача получить в конденсированном виде окисные соединения алюминия и кремния низкой валентности в количествах, достаточных для их всестороннего изучения, и сопоставить свойства этих соединений с признаками фаз, обнаруженных в металле.

Опыты проводили также в печи сопротивления с графитовым нагревателем в застойной атмосфере аргона при температуре горячей зоны 1800–1900°C. Субокислы алюминия были получены после охлаждения на торцевой или наружной поверхностях алунодowego тигля в местах, соответствующих границам горячей зоны. Аналогичный конденсат на стенках тигля был получен при выдержке в корундизовом тигле расплава ферроалюминия, содержащего около 10% алюминия. Конденсат имел вид кристаллов игольчатой или дендритной формы. Конденсат монооксида кремния получили на внутренней поверхности кварцевой грубы. В результате последовательного восстановления окиси алюминия моноокисью углерода был получен ряд окислов, в том числе  $Al_2O$  и глиноземная шпинель  $Al_2O \cdot Al_2O_3$ , характеристики которой ( $N = 1,726 - 1,737$ ,  $a = 8,09 \text{ \AA}$ ) отличаются от приводимых в литературе, но представ-

яются нам более достоверными. Полученные субокислы были идентифицированы путем комплексного исследования петрографическим, рентгеноструктурным и электроннографическим методами.

При электрошлаковом переплаве стали IO на лабораторной установке ЭМП наблюдали восстановление окисных включений, сопровождавшееся изменением их состава, агрегатного состояния и размеров.

Полученные результаты позволяют заключить, что состав окисных включений в металле электрошлакового переплава в значительной мере определяется составом используемого флюса. В процессе переплава из шлака восстанавливаются алюминий, кальций и магний, которые взаимодействуют с включениями, переходящими в слиток из исходного металла, изменяя их состав, а также образуя на фронте затвердевания собственные включения. В итоге после переплава под глиноземистым шлаком в металле появляются включения корунда, а в результате переплава под известковым или магнезиальным флюсами - включения известкового  $\beta$  - глинозема, магнезиальной шпинели и соответствующих стекол

В четвертой главе диссертации обсуждаются представления о процессах формирования продуктов раскисления стали, сложившиеся на основании полученных данных.

Результаты проведенных экспериментов по диффузионному раскислению свидетельствуют о преимущественно спонтанном зарождении гомогенных продуктов раскисления даже сплавами раскислителей.

При использовании практически любого сильного раскислителя происходит гомогенное зарождение и формирование включений разных типов: скоплений мелких зерен, дендритов, идиоморфных кристаллов и глобулей.

Результаты нашей работы позволяют утверждать, что все наблюдаемые разновидности включений - продуктов раскисления являются первичными. Основными условиями, определяющими выделение продуктов реакции в том или ином виде, являются степень химического пересыщения металла, соотношение концентраций раскислителя и кислорода и условия их подвода к растущему зародышу. Превращение включений в гетерофазные происходит в про-

цессе кристаллизации жидких включений при охлаждении, в результате восстановления окисла железа или слабого раскислителя более сильным, либо в результате коагуляции твердых и жидких включений.

Однако возможность гомогенного зарождения включений при раскислении стали сильными раскислителями не исключает при благоприятных условиях гетерогенного зародышеобразования, так как пересыщение, необходимое для гетерогенного выделения продуктов реакции, всегда меньше, чем для гомогенного.

В свете изложенных представлений о механизме образования неметаллических включений в стали сделана попытка определить происхождение некоторых наиболее часто встречающихся типов окисных включений в металле открытой выплавки (мелкие - (1-15 мк) зерна и более крупные (10-20 мк) гексагональные пластинки и глобулы корунда,  $\beta$  - глинозем, шпинели и т.п.), проследить изменения, происходящие в процессе переплава стали, объяснить появление новых включений в переплавленном металле. Морфологические признаки некоторых включений свидетельствуют о переходе их из исходного в переплавленный металл.

На основании результатов работы сделано заключение, что фазовый состав неметаллических включений и взаимоотношение фаз связаны, главным образом, с процессами образования включений, а форма - с условиями их кристаллизации. Следовательно, морфологические особенности включений в металле, позволяют представить их происхождение, момент и механизм образования.

## В В О Д Н

1. Химический и минералогический состав окисных включений в готовой стали мало зависит от способа выплавки и определяется, главным образом, конечным раскислением, взаимодействием имеющихся включений с металлическим расплавом и процессами, протекающими при кристаллизации слитка.

2. При введении любого раскислителя в жидкую сталь зарождаются продукты раскисления, природа которых определяется существующими в данном локальном объеме концентрационными условиями.

3. При раскислении сильными раскислителями (алюминием, титаном, цирконием, РЗМ) образующиеся продукты раскисления по форме можно разделить на четыре вида: скопления мелких зерен, дендриты, идиоморфные кристаллы, глобулы. Все четыре вида включений являются первичными. Продукты раскисления кремнием выделяются только в жидком виде.

4. В процессе выдержки металла в жидком состоянии форма твердых включений изменяется, приближаясь к идиоморфной. При повышении концентрации сильных раскислителей в жидких включениях замещается железо, затем более слабый раскислитель. Процесс замещения продолжается до чистого окисла раскислителя. Высшие окислы раскислителя восстанавливаются до низших. Введение РЗМ приводит к образованию их окисных и сульфидных включений. Уточнены оптические константы окисных соединений церия и лантана  $CeO_2$ ,  $Ce_2O_3$ ,  $La_2O_3$ . Определены константы сульфидных соединений  $CeS$ ,  $Ce_2S_3$ ,  $LaS$ ,  $LaS_2$ .

5. Первичные продукты реакций раскисления сохраняются в жидком металле и переходят в готовую сталь даже после переплавных процессов. Твердые продукты раскисления в готовой стали наблюдаются в неизменном или малоизмененном виде. Жидкие включения в результате взаимодействия с металлическим расплавом и превращений в окисной фазе при охлаждении могут стать многофазными.

6. Основная часть включений в металле ВДП образуется при кристаллизации слитка. При этом состав включений определяется составом металла перед фронтом кристаллизации. Часть включений из исходного металла переходит в наплавляемый слиток. Выявлены типы включений, образовавшиеся в процессе переплава. Показано, что включения кальциевого  $\beta$ -глинозема и магнезиальной шпинели могут образоваться при кристаллизации слитка за счет растворенных в металле кальция и магния.

7. Трансформация включений при электрошлаковом переплаве обуславливается развитием восстановительных реакций, вызывающих изменение состава, формы и размеров включений, появление низших окислов. Состав окисных включений электрошлакового слитка во многом определяется составом флюса. Эксперименталь-



но подтверждена возможность появления в переплавленном металле новых включений корунда, кальциевого  $\beta$ -глинозема и магниезиальной шпинели.

8. Фазовый состав неметаллических включений и взаимоотношение этих фаз обусловлены, главным образом, процессами образования включений; их форма — условиями кристаллизации. На основании изучения этих признаков и с учетом влияния изменения характера включений при изменении условий пребывания их в жидком металле высказано предположение о происхождении некоторых видов кислородных включений в сталях промышленного производства.

Основное содержание исследования опубликовано в следующих работах:

1. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Речкалова А.В. Механизм образования неметаллических включений при раскислении железа алюминием, цирконием и титаном. Известия вузов. Черная металлургия, 1969, №4, с.11.

2. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Дудоров В.И., Речкалова А.В. Образование включений при совместном раскислении железа кремнием и алюминием. Известия АН СССР. Металлы, 1971, №5, с.3.

3. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Дудоров В.И., Речкалова А.В. Влияние марганца на формирование продуктов раскисления железа алюминием и кремнием. Известия вузов. Черная металлургия, 1972, №2, с.56.

4. Поволоцкий Д.Я., Речкалова А.В., Мальков Н.В., Рошин В.Е., Панталеенко Н.В., Сапельников П.П. Влияние редкоземельных элементов на природу продуктов раскисления нержавеющей стали. Сб. "Современные проблемы электрометаллургии стали". Труды всесоюзной конференции. ЧПИ, Вып.116, Челябинск, 1973, с.41.

5. Речкалова А.В., Поройкова Г.Н., Становнова Л.Б. Окисные включения в нержавеющей стали. Тезисы XV colloquiuma центральных заводских лабораторий МЧМ СССР, Москва, 1973г.

6. Рощин В.Е., Поволоцкий Д.Я., Носач В.Ф., Речкалова А.В. Исследование неметаллических включений, содержащих редкоземельные металлы. Известия вузов. Черная металлургия, 1973, № 6, с.110.

7. Поволоцкий Д.Я., Гречин Р.И., Речкалова А.В., Кофман Б.В., Рощин В.Е. Поведение кислорода и продуктов раскисления при вакуумном дуговом переплаве. Сталь, 1973, № 12, с.1092.

8. Поволоцкий Д.Я., Рощин В.Е., Речкалова А.В., Гречин Р.И. Морфология окисных включений в металле вакуумного дугового переплава. Известия вузов. Черная металлургия, 1974, № 4, с.55.

9. Рощин В.Е., Поволоцкий Д.Я., Речкалова А.В., Становнова Л.Б., Шинкина Н.С. К вопросу образования субокислов алюминия и кремния при раскислении расплавов железа. Известия АН СССР. Металлы, 1974, № 6, с. 5.

10. Рощин В.Е., Поволоцкий Д.Я., Катков А.В., Речкалова А.В., Становнова Л.Б. Окисные и сульфидные включения церия и лантана в железе. Известия АН СССР. Металлы, 1974, № 5, с.80.

По материалам диссертации сделаны сообщения:

1. На первой Всесоюзной конференции по современным проблемам электрометаллургии стали. Челябинск, 1971г.

2. На XV коллоквиуме центральных заводских лабораторий по ИЧМ СССР. Москва, 1973г.

3. На второй Всесоюзной конференции по современным проблемам электрометаллургии стали. Челябинск, 1974г.

4. На XVI коллоквиуме центральных заводских лабораторий МЧМ СССР (по вопросам металловедения, механических испытаний металлов и методов неразрушающего контроля качества металла). Череповец, 1974 г.

5. На научно-техническом семинаре ЦЗЛ Челябинского металлургического завода, 1975 г.