

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Голубцов Валерий Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАФИНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА ОТ ОКИСНЫХ
НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО
ПЕРЕПЛАВА

Специальность 05.16.02 -
"Металлургия черных металлов"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
1975

Работа выполнена на кафедре металлургии черных металлов Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

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

Официальные оппоненты: профессор, доктор технических наук
Г.А.Хасин;
старший научный сотрудник, кандидат
технических наук
Д.А.Сосков.

Ведущее предприятие - Челябинский металлургический завод.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1975г.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1975г.
в _____ часов, в аудитории _____ на заседании Совета
по присуждению ученых степеней металлургического факультета
Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета или прислать отзыв (отзыв присылается в двух экземплярах, заверенных печатью) по адресу: 454044, г. Челябинск, 44, проспект имени В.И.Ленина, 76, телефон 39-39-64.

Ученый секретарь Совета
доцент, кандидат технических наук *В. Гончар* (Гончар В.Н.)

ЧЕЛЯБИНСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
БИБЛИОТЕКА

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Постоянно возрастающие требования к качеству сталей и сплавов в условиях научно-технического прогресса привели к широкому использованию в металлургии качественных сталей и сплавов электрошлакового переплава (ЭШП) расходуемых заготовок, который позволяет глубоко очистить металл от серы, неметаллических включений и получить слиток с плотной однородной структурой.

Большая заслуга в разработке теоретических основ ЭШП принадлежит Ю.В.Латашу, Б.И.Медовару, М.М.Клеву. Эффективность применения ЭШП с целью рафинирования металла от окисных неметаллических включений подтверждена результатами исследований О.Д.Молдавского, В.В.Хлынова, Б.М.Никитина и других исследователей.

Однако анализ литературных данных показывает, что механизм удаления кислорода и окисных включений из металла при ЭШП изучен еще недостаточно. Процесс удаления окисных неметаллических частиц может лимитироваться доставкой их на межфазные границы металл-шлак, адгезией включений шлаковым расплавом или же растворением включений в шлаке или в металле на горне расходуемого электрода в районе высокотемпературного очага. Результаты исследований по этим вопросам носят противоречивый характер. Противоречивы и мнения о происхождении встречающихся в электрошлаковом металле окисных включений.

Знание механизма удаления кислорода и окисных включений в процессе электрошлакового переплава позволит вести совершенствование технологии выплавки исходного металла по пути ее упрощения и сокращения длительности рафинировочного периода без ухудшения качества переплавленного металла, а также совершенствование технологии самого переплава.

Цель работы.

1. Изучить поведение окисных неметаллических включений на последовательных стадиях переплава: конус плавящегося электрода - капля - жидкая металлическая ванна - кристаллизующийся слиток.

2. Проследить процессы изменения природы включений в процессе переплава и выявить наследственную связь между включениями исходного и переплавленного металла.

3. Исследовать особенности поведения продуктов раскисления перед фронтом кристаллизации наплавленного слитка.

4. Разработать и опробовать упрощенную технологию выплавки исходного металла.

Научная новизна. В лабораторных и промышленных условиях изучено поведение различных по составу окисных неметаллических включений на последовательных стадиях электрошлакового переплава. Переплавы металла одного и того же состава на установках ЭСП и ВДП позволили выявить общие закономерности и специфические особенности удаления включений в ходе этих переплавных процессов. Изучены процессы трансформации исходных включений при переплаве, исследовано распределение продуктов раскисления различного состава в литой структуре переплавленного металла в зависимости от условий кристаллизации.

Практическая ценность. Предложена и опробована технология выплавки исходного металла для рафинирующих переплавов, которая позволяет значительно (в 2-3 раза) сократить длительность восстановительного периода и получить после перепада металла достаточно высокого качества.

Апробация. Материалы диссертации доложены на:

1. Второй Всесоюзной научной конференции по современным проблемам электрометаллургии стали. Челябинск, декабрь, 1974.

2. Научно-теоретическом семинаре кафедры металлургии стали ЧПИ, Челябинск, январь, 1975.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в трех статьях и тезисах доклада на Всесоюзной конференции.

Объем работы. Диссертация состоит из 5 глав. В главе I рассматриваются основные представления о поведении кислорода и окисных включений в процессе электрошлакового переплава, критически анализируются литературные данные о поведении неметаллических включений перед фронтом затвердевания. В главах II, III излагаются методика и результаты экспериментов, проведенных в промышленных и лабораторных условиях. В IV главе проводится обсуждение всех результатов экспериментов. В V главе приведены результаты статистической обработки данных текущего контроля с целью выяснения влияния технологии выплавки исходного металла на содержание неметаллических включений после переплава.

Диссертация содержит 136 стр. текста с 3 таблицами в нем, II отдельных таблиц, 23 рисунка, библиографии из 154 наименований, приложения на II стр., в том числе I табл.

Удаление кислорода и продуктов раскисления
на последовательных стадиях электрошлакового
переплава

Исследования выполнены в промышленных и лабораторных условиях. Электрошлаковый переплав металла на промышленной установке проводили в обычных условиях ее работы. Исходный металл для переплава - низкоуглеродистое железо (0,09% C) выплавляли в 10-тонной дуговой электропечи. Чтобы выявить особенности поведения на разных стадиях электрошлакового переплава наиболее распространенных продуктов раскисления стали - глинозема и кремнезема, в исходном металле формировали включения того или иного состава. Для этого металл раскисляли в изложницах емкостью 1250 кг только гранулированным алюминием (10 кг/т) или только мелкодробленым 75%-ным ферросилицием (6 кг кремния на 1 т).

ЭШП заготовок сечением 200 мм проводили в кристаллизатор диаметром 420 мм под флюсом АНФ-6. Для сравнения переплавляли металл аналогичного состава в вакуумной дуговой печи в кристаллизатор диаметром 400 мм.

В отобранных пробах (при ЭШП - в каплях и пробах из ванны; при ВДП - в каплях и быстро кристаллизующемся слое, собранных с поддона), а также в расходующих электродах и наплавленных слитках (по высоте и сечению) методом вакуум-плавления на установке ЕАО-202 фирмы "Бальцерс" определяли содержание кислорода.

Неметаллические включения в пробах изучали металлографическим методом на шлифах с последующим локальным выделением наиболее характерных включений под микроскопом для петрографического исследования, а в исходном и переплавленном металле, кроме того, иммерсионным методом в электролитически выделенных осадках. Для диагностики ряда включений привлекали локальный рентгеноструктурный и электронномикроскопический анализы выделенных включений, а также микрорентгеноспектральный анализ включений на шлифе. Химическим методом определяли состав осадков, со-

держание раскислителей до и после переплава, состав шлака по ходу ЭШП.

Использование в работе методика отбора проб позволила анализировать содержание примесей в исходном электроде, капле, падающей с конца расходуемого электрода, в ванне жидкого металла и в слитке, а также сравнить их поведение при электрошлаковом и вакуумно-дуговым переплавах. Из данных по содержанию кислорода в металле по ходу переплава видно (рис. 1), что ВДП хорошо раскисленного металла с существенно разными начальными содержаниями кислорода приводит к практически одинаковым результатам, а конечное содержание кислорода в таком металле после ЭШП выше и соответствует его содержанию в металле, подвергнутом дуговому переплаву в атмосфере аргона.

Предполагая, что роль углеродного раскисления металла при дуговом переплаве характеризуется разницей содержания кислорода в металле, переплавленном в аргоне и в вакууме, из приведенных данных следует вывод об удалении и при ВДП и при ЭШП подавляющей части содержащегося в электродах кислорода механическим путем в виде окисных включений.

Обращает внимание снижение содержания кислорода при ВДП в основном уже на стадии образования капли. При ЭШП значительное удаление кислорода на торце электрода наблюдалось лишь при переплаве металла, раскисленного алюминием (97-130% от общего количества удалившегося кислорода), в то время как при переплаве раскисленного кремнием металла отчетливо прослеживается постепенное удаление кислорода на последовательных стадиях электрод - капля - ванна - слиток.

Металлографический анализ и результаты электролитического растворения металла подтвердили, что снижение содержания кислорода при переплаве обусловлено резким уменьшением количества окисных включений уже на стадии образования капли на торце оплавляемых заготовок.

Удаление основного количества кислорода при ВДП уже к моменту формирования капли, одинаковые результаты дугового переплава хорошо раскисленного металла в атмосфере аргона и на установках ЭШП, и в то же время разная степень удаления кремнистых и

глиноземистых включений на стадии формирования капли при ЭШП свидетельствуют о существенно разных условиях удаления включений из металла при ЭШП и ВДП, что объяснено разной толщиной пленки на торце электрода и разными условиями течения металла в этой пленке.

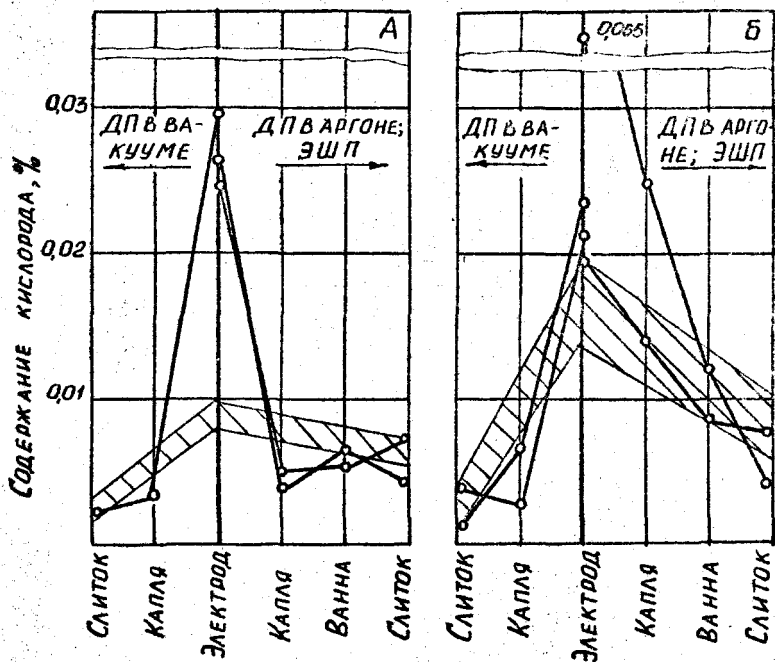


Рис.1. Изменение содержания кислорода в металле по ходу переплавов: А - переплав металла, раскисленного алюминием; Б - переплав металла, раскисленного кремнием. Затрихованные области - результаты работы Поволоцкого Д.Я., Гречина Р.И., Речкаловой А.В. и др. *Сталь*, 1973, в 12, с.1092

Выплавляющиеся из кратерных зон на торце расходуемого электрода при ВДП порции металла под воздействием дуги "сдуваются" с твердой подложки к периферийной зоне электрода в радиальном направлении. Толщина пленки жидкого металла на торце расходуемого электрода составляет микроны, благодаря чему выплавляющиеся из твердой матрицы включения при ВДП сразу получают контакт с газовой фазой. Это обеспечивает высокую степень сжигания металла от глиноземистых и кремнеземистых включений при ВДП.

При ЭШП движению пленки по торцу электрода противодействуют выталкивающая сила шлака и сила трения на поверхности раздела металл - шлак. По этим причинам толщина пленки при ЭШП заметно превосходит толщину пленки жидкого металла на торце электрода при ВДП, что приводит к разной степени удаления разнородных частиц. Условия выделения из турбулентных потоков металла в пленке на вершине конуса плавящегося электрода при формировании капли высокоглиноземистых включений, обладающих более высокой плотностью и имеющих неправильную форму более благоприятны, чем сферических и более легких силикатов. Последние в значительном количестве остаются в объеме капли, вносятся в ванну кристаллизатора и продолжают удаляться из жидкой металлической ванны в результате всплывания.

Однако ряд изложенных результатов получен на сравнительно небольшом количестве экспериментов, выполненных на промышленных установках, и требует дополнительного подтверждения. На промышленных установках в связи с высокой скоростью плавления и сравнительно высокой степенью чистоты металла практически также невозможно изучить процессы трансформации включений, выявить участие отдельных компонентов шлакового расплава в формировании включений, исследовать влияние скорости плавления на поведение включений. Исследование этих вопросов удобнее произвести на лабораторной установке электрошлакового переплава, на которой можно поставить широкий круг специальных экспериментов без значительных материальных затрат.

Исходный металл (сталь 10) для расходующих электродов выплавляли в индукционной печи емкостью 150 кг. Часть металла раскислили только алюминием (0,7%), который присаживали на струну ме-

талла при сливе плавки в ковш. Оставшуюся в печи часть металла раскислили 75%-ным ферросилицием из расчета на 1,0% кремния. Полученные слитки проковали на прутки диаметром 25 мм и изготовили из них расходующие электроды. Электроды переплавили на лабораторной электрошлаковой установке с диаметром кристаллизатора 5 см под флюсами систем $Al_2O_3 - CaF_2$, $CaO - CaF_2$, $MgO - CaF_2$ (АНФ-6, АНФ-7, АНФ-9). Одинаковую скорость плавления металла при переплаве под различными флюсами устанавливали путем изменения величины тока в пределах 550-700 А. Часть электродов переплавили с более высокой скоростью, что достигалось увеличением силы тока до 900 А. Повышение подаваемой мощности позволяло увеличить скорость плавления электрода в 1,5 раза.

Из торца расходующего электрода со сформировавшейся каплей и половинки слитка, разрезанных по осевой плоскости, изготавливали микрошлифы для металлографического и микрорентгеноструктурного анализа, а вторую половинку слитка и остаток электрода использовали в качестве образцов для электролитического растворения и последующего рентгеноструктурного и кристаллооптического анализа осадков.

По ходу переплава кварцевыми ложечками, которые подводили под конус плавящегося электрода, улавливали падающие с электрода капли металла. Одновременно кварцевыми трубками отбирали пробы металла из ванны кристаллизатора. Аналогичные пробы отбирали при переплаве на нормальной и повышенной мощности.

В пробах, отобранных по ходу переплава, а также в металле расходующих электродов и в слитках определяли содержание кислорода на экскалографе "Бальцерс" ЕА0-202. Химическим методом определяли содержание раскислителей в металле, а также состав шлака до и после переплава.

На серии плавок использовали составные электроды, что позволило после переплава расходующей части выдерживать жидкую металлическую ванну под шлаком в рабочем режиме с помощью нерасходующей части электрода, выполненной из молибдена. В этом случае содержание кислорода в металле определяли не только в теле слитка, но и по высоте зафиксированной ванны жидкого металла.

Как и при переплаве на промышленной установке, значительное удаление кислорода (70-81%) наблюдалось на торце электрода, если металл был раскислен алюминием. При переплаве раскисленного кремнием металла наблюдали постепенное снижение содержания кислорода на последовательных стадиях электрод-капля-ванна-слиток. Переплав раскисленного кремнием металла под разными флюсами выявил некоторое увеличение степени рафинирования металла от кислорода на стадии образования капли под шлаками систем $\text{CaO}-\text{CaF}_2$ и $\text{MgO}-\text{CaF}_2$ по сравнению со степенью рафинирования металла на этой стадии при переплаве под флюсом АНФ-6 (68-73 и 57% соответственно). Однако в наплавленных слитках получены практически одинаковые содержания кислорода, причем конечное содержание кислорода в слитках не зависело от его содержания в расходуемых электродах.

При увеличении скорости плавления металла, раскисленного кремнием, в 1,5 раза наблюдали некоторое повышение степени его рафинирования от окисных включений на стадии образования капли (с 57-73% до 74-77%) по сравнению со степенью рафинирования металла на этой стадии при нормальном режиме переплава. Вследствие более неблагоприятных условий для всплывания включений силикатов в наплавляемом с более высокой скоростью затвердевающим слитке эта разность сохранялась до конца процесса рафинирования. Видимо поэтому более низкие содержания кислорода в слитках металла, раскисленного кремнием, получены в случае его переплава под флюсами АНФ-7 и АНФ-9.

Полученные результаты позволяют предполагать, что полнота очищения металла от глиноземистых и силикатных включений на стадии пленочного течения металла по конусу электрода контролируется, по-видимому, условиями перехода частиц через межфазную границу металл - шлак, которые, в свою очередь, определяются межфазными свойствами неметаллических частиц с металлическим расплавом, и практически не зависят от условий растворения включений в шлаке.

Увеличение степени рафинирования раскисленного кремнием металла на этой стадии, а также некоторое снижение конечного содержания кислорода в слитках при переплаве под известковосодер-

жидким и магниальным шлаками на повышенной скорости плавления по сравнению с конечным содержанием кислорода, полученным при переплаве на нормальном режиме, достигается, по-видимому, за счет более благоприятных условий выделения включений в турбулизованной пленке, уменьшения времени воздействия кислорода воздуха на расплавленный металл и, как следствие, уменьшения окисления его. Накопление по ходу переплава закиси железа в шлаке, как показали наши исследования, сопровождается увеличением содержания кислорода в металле на всех последовательных стадиях рафинирования. Разница в содержании кислорода, обусловленная изменением содержания закиси железа в шлаке, сглаживается лишь к моменту затвердевания жидкой металлической ванны после окончания плавки металла и лишь в том случае, когда он раскислен кремнием, что, по-видимому, объясняется всплыванием вторично образовавшихся включений кремнезема.

Действительно, эксперименты показали, что при мгновенном прекращении переплава металла, раскисленного кремнием, наблюдается некоторое повышение содержания кислорода в верхней части слитка по сравнению с его содержанием в теле слитка. Разницы содержания кислорода в соответствующих пробах переплавленного металла, раскисленного алюминием, не обнаружили. Эти результаты подтверждены и данными металлографического контроля, причем в слитке, раскисленного кремнием, по высоте жидкой ванны к моменту прекращения плавки наблюдали седиментационное расслоение включений силикатов. Глиноземистые же частицы всегда были распределены практически равномерно.

Отсутствие заметного влияния скорости переплава в изученных пределах на степень рафинирования металла от неметаллических включений объясняется, по-видимому, малым изменением толщины пленки на торце электрода, а также противоположным влиянием на степень рафинирования металла от окисных включений двух факторов - уменьшения времени обработки металла рафинирующим шлаком, с одной стороны, и снижения степени окисления электродного металла кислородом воздуха и флюса - с другой.

Поведение включений - продуктов раскисления на фронте затвердевания металла

Изучали распределение силикатных и высокоглиноземистых включений в дендритной структуре промышленных слитков металла, прошедшего рафинирующий (ЭШП или ВДП) переплав, а также в металле такого же состава, кристаллизовавшемся в чугунных 10-килограммовых изложницах или в 700-граммовых тиглях в печи Таммана с охлаждением последних в воде или вместе с печью. Из слитков ЭШП и ВДП вырезали поперечные темплеты и изготавливали микрошлифы из осевой части, на половине радиуса слитка и краевой зоны. Аналогичные шлифы приготовили из проб, отобранных на расстоянии 0,5 от 10-килограммовых и 700-граммовых слиточков. Шлифы с отмеченными включениями травили на выявление дендритной структуры и определяли положение включений: в осях дендритов, в межосном пространстве или на границе осей и межосного пространства (в промежуточной зоне).

Результаты металлографического изучения загрязненности металла ЭШП и ВДП различными типами окисных включений и распределения включений в литой структуре слитков показали, что включения корунда располагаются преимущественно в межосном промежутке (75-85% всех включений), в то время как положение включений кремнезема и алумосиликатов практически равновероятно в осях и в межосных объемах. Включения корунда в сравнении с включениями силикатов располагаются чаще в переходной зоне. Количество наиболее крупных включений кремнезема и алумосиликатов в 1,5-2 раза больше в осях, чем в межосных промежутках.

Подобный характер распределения окисных включений в дендритной структуре отмечали и другие исследователи. Мы предприняли попытку оценить характер распределения включений с точки зрения условий затвердевания металла. Согласно нашим расчетам продолжительность кристаллизации металла разных проб изменялась в 10 раз.

Приведенные данные (рис.2) показывают, как изменяется соотношение включений разного состава в осях дендритов и межосных промежутках с изменением площади, занимаемой осями дендритов и

междендритными промежутками, которая в свою очередь связана с временем кристаллизации. Видно, что соотношение включений корунда и алумосиликатов в осях и межосных промежутках не зависит от условий кристаллизации, в то время как с увеличением площади осей дендритов количество включений кремнезема в них заметно увеличивается. Представляется любопытным также то, что соотношение количества включений алумосиликатов в осях и межосных промежутках остается всегда равным примерно единице, для корунда оно равно 0,20-0,35, а для включений кремнезема изменяется в зависимости от скорости затвердевания от 0,6 до 2,2.

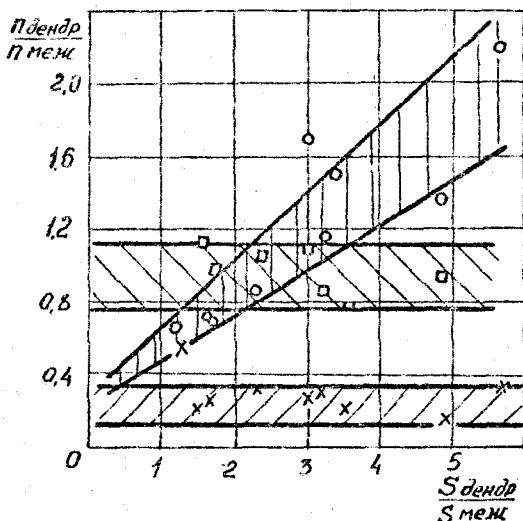


Рис.2. Соотношение между количеством включений в осях ($n_{дендр}$), межосных промежутках ($n_{меж}$) и площадью, занимаемой осями ($S_{дендр}$) и межосными промежутками ($S_{меж}$): X - корунд, O - кремнезем, □ алумосиликаты

Данные о количестве разных по размеру включений кремнезема в пробах раскисленного кремнием металла из слитков ЭШП и ВДП свидетельствуют о том, что в участках слитка, затвердевающих с высокой скоростью, образуется множество мелких включений, количество которых с увеличением продолжительности затвердевания уменьшается. Одновременно количество включений средних размеров сначала возрастает, а затем уменьшается, а число крупных включений непрерывно увеличивается (рис.3).

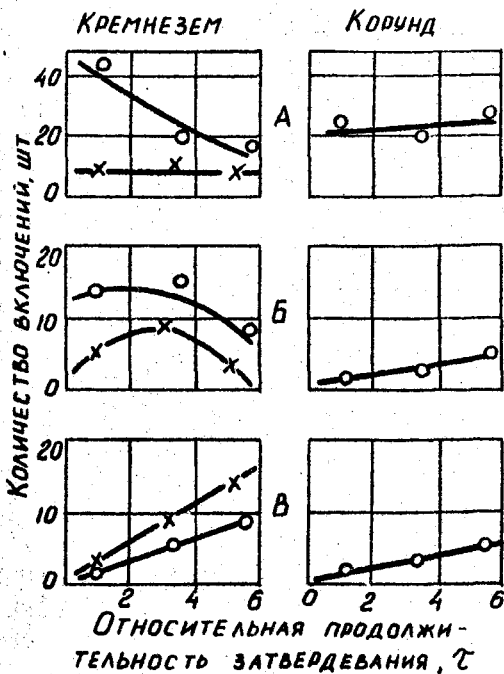


Рис.3. Количество включений - продуктов раскисления разного размера в зависимости от продолжительности кристаллизации: А-включения размером до 3,3 мк, Б-3,3-6,6 мк, В-более 6,7 мк.
x - слиток ВДП, o - слиток ЭШП

Количество видимых включений корунда всех размеров с увеличением длительности кристаллизации возрастает. Линии, характеризующие изменение числа крупных включений кремнезема, а также крупных и средних включений корунда с ростом времени кристаллизации, пересекают оси ординат в нулевой точке, что свидетельствует, по-видимому, об отсутствии включений таких размеров в жидком металле перед фронтом кристаллизации.

Отсутствие в периферийных быстро затвердевающих объемах металла крупных включений и преимущественное расположение отдельных крупных включений кремнезема в других зонах слитка в осях дендритов позволяют заключить, что выросшие или укрупнившиеся в двухфазной зоне включения силикатов успевают вырасти в оси дендритов. Таким образом, это свидетельствует о весьма благоприятных условиях захвата включений силикатов растущими дендритами металла. Если же перед фронтом растущих кристаллов оказывается включение корунда, то более вероятным (в 75-85 случаях из 100) является оттеснение его в междендритный промежуток. Для включения алюмосиликатов в аналогичной ситуации в одинаковой степени вероятен захват его растущим кристаллом или оттеснение в междендритный промежуток.

Такое поведение включений у поверхности затвердевающего металла объяснено тем, что активность примесной частицы к растущему кристаллу определяется близостью параметров атомных решеток и ориентацией частицы по отношению к кристаллу. Расчеты показывают, что у силикатных включений наблюдается хорошее совпадение плоских решеток с плоскими решетками кристаллов железа.

Это приводит к тому, что чем дольше соприкасаются растущий дендрит металла и включение кремнезема, тем вероятнее захват включения дендритом. Поэтому при медленной кристаллизации в осях дендритов оказывается значительное количество образовавшихся или укрупнившихся в двухфазной зоне включений кремнезема. Срастание же корунда с кристаллами железа возможно лишь по его базисным плоскостям, составляющим 25% от ограничивающих поверхность кристалла поверхностей. Поэтому захват кристаллом включений корунда происходит, по-видимому, лишь при их благоприятной взаимной ори-

ентации. Количество благоприятно ориентированных к кристаллу металла включений корунда не превышает 15-25%.

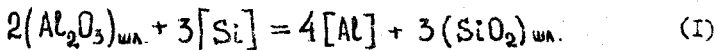
Влияние электрошлакового переплава на природу окисных включений

При ЭШП происходит не только рафинирование металла от окисных включений, но в ряде случаев коренным образом изменяется и их состав, а также форма, размеры и распределение в литой структуре. Однако причины и механизм трансформации включений изучены недостаточно.

В этой связи методами петрографии, металлографического и микрорентгеноспектрального анализов изучали природу окисных включений - продуктов раскисления в мягком железе на последовательных стадиях процесса электрошлакового переплава его на лабораторной установке под флюсами систем $Al_2O_3 - CaF_2$, $CaO - CaF_2$, $MgO - CaF_2$, $Al_2O_3 - NaF$. Особенно наглядно процесс изменения исходных включений прослеживался при переплаве раскисленного кремнием металла под глиноземистым флюсом АНФ-6.

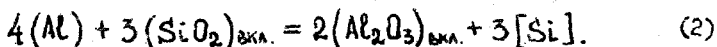
В расходуемых электродах, раскисленных кремнием, окисные включения были представлены высококремнистым стеклом размерами частиц 3-80 мк и показателем преломления $N = 1,460-1,500$, а также с $N = 1,510-1,646$. В виде призматических выделений избыточной фазы в силикатах в незначительном количестве присутствовал муллит и иногда зерна корунда. В осадке, полученном после растворения переплавленного металла, при петрографическом анализе найдены однородные и неоднородные по структуре глобулы (5-20 мк) переменного состава с показателями преломления $N = 1,737-1,760$, а также мелкие (1-8 мк) кристаллы корунда. На металлографическом шлифе, вырезанном из слитка, хорошо видно появление на глобулах кремнеземистого стекла сначала тонкой оболочки с повышенным показателем и последующее увеличение толщины этой оболочки от периферии к центру включения. По мере увеличения толщины оболочки происходило ее растрескивание, в результате чего вместо первоначально глобулярного включения образовалось скопление осколков неправильной формы. Таким обра-

зом, прослеживается постепенное восстановление силикатов более сильным раскислителем, поступающим во включения из металлического расплава. Как показали термодинамические расчеты, при переплаве под глиноземистым флюсом АНЭ-6 вследствие низкой активности кремнезема и высокой активности глинозема в шлаке на границе раздела металл - шлак возможно протекание реакции:



Химический анализ металла подтвердил, что в результате переплава содержание алюминия в нем возрастает с 0,003% до 0,05-0,06%.

В объеме жидкого металла на границе металл - кремнистое включение вследствие высокой активности кремнезема и низкой активности глинозема во включении возможно протекание реакции:



Расчеты показывают, что при восстановлении алюминием составляющих кремнеземистых включений их объем увеличивается на 27%. Вследствие возникновения напряжений в образовавшейся на поверхности включений твердой оболочке последняя растрескивается. Трещины заполняются жидким металлом, в результате чего подвод растворенного в нем раскислителя (в данном случае алюминия) к внутренним областям включений облегчается, а это ускоряет процесс восстановления. В результате глобулярная форма включений изменяется и образуются включения типа конгломерата частиц корунда.

В результате переплава раскисленного кремнием металла под известково-содержащим и магниальными флюсами наблюдали последовательное восстановление кремнистого стекла кальцием и магнием с образованием соответствующих стекол. Сканирование в переплавленном металле силикатных включений в линиях CaK_1 и MgK_2 на микрорентгеноспектральном анализаторе "Камера" подтвердило присутствие в их составе кальция и магния. По-видимому, и в этом случае происходил аналогичный процесс взаимодействия неметаллических частиц с перешедшими из флюсового расплава кальцием или магнием.

В меньшей мере кальций и магний изменяли состав термодинамически более устойчивых глиноземистых включений. Однако и в результате переплава раскисленного алюминием металла состав включений изменялся - появлялись глиноземная шпинель, известковый β -глинозем, магнезиальная шпинель. При этом алюминий, кальций и магний в составе включений появлялись даже в том случае, когда при переплаве отсутствовали источники дополнительного загрязнения ими металла (например, переплав под флюсом АНФ-6, синтезированным из чистых компонентов). Поэтому следует допустить возможность взаимодействия включений при переплаве с тем незначительным количеством этих элементов, которым может быть загрязнен исходный металл.

Поступление небольших количеств алюминия всегда возможно как примеси, вносимой сплавами кремния, а незначительное количество кальция и магния может быть восстановлено из шлака и футеровки при выплавке исходного металла. При переплаве благодаря особенностям затвердевания металла в кристаллизаторе, эти примеси накапливаются перед фронтом кристаллизации в таком количестве, что могут принять участие в раскислении и восстановлении кремния в уже имеющихся включениях. Образующиеся при этом стекла сложного состава с участием кальция и магния имеют относительно низкую температуру плавления и находятся в жидком состоянии. Поэтому кальций и магний по сечению таких включений распределяются практически равномерно.

Чтобы установить, переходят ли в наплавляемый слиток включения из расходуемого электрода, в лабораторных условиях был поставлен специальный эксперимент.

Для этого в 15-килограммовой индукционной печи с кислой футеровкой выплавляли мягкое железо. После окисления примесей железной рудой металл раскисляли в печи кальцием (0,05%) или магнием (0,07%). Окончательное раскисление железа проводили в печи алюминием (0,3%). Отлитые в кварцевые трубки расходоуемые электроды переплавляли под флюсом, содержащем 70% фтористого натрия и 30% глинозема. Сканирование на микроанализаторе "Камека" в линиях CaK_α , MgK_α и AlK_α включений в исходном и переплавленном металле выявило в их составе присутствие кальция или магния.

Так как кальций и магний присаживали только для предварительного раскисления, а на всех последующих стадиях исключали даже контакт металла с кальций- или магниемсодержащими материалами, то это можно расценивать как экспериментальное доказательство сохранения в течение длительного времени первичных включений и их перехода даже в переплавленный металл.

Влияние технологии выплавки исходного металла на содержание неметаллических включений в металле после переплава

Как следует из наших данных, электрошлаковый переплав обеспечивает глубокое рафинирование металла от неметаллических включений и позволяет получать чистый по включениям металл даже в том случае, когда в расходных электродах их содержится относительно много. Между тем, металл для расходных электродов в открытых сталеплавильных агрегатах обычно выплавляют по такой же технологии, что и металл, направляемый потребителям непосредственно. Эта технология предусматривает максимальное рафинирование металла от включений в течение длительного (до 1,0-1,5 часа) восстановительного периода в ванне открытых печей. Это снижает производительность агрегатов, хотя вряд ли всегда является оправданным. В этой связи представляло интерес изучить влияние технологических параметров выплавки исходного металла на качество стали после ЭШП и ВДП.

Возможность сокращения длительности восстановительного периода при выплавке исходного металла для рафинирующих переплавов изучали двумя методами: во-первых, при помощи статистической обработки данных текущего контроля металла открытой выплавки и после переплава, во-вторых, опробованием выплавки исходного металла конструкционных марок стали по упрощенной технологии с сокращенным восстановительным периодом.

Методами математической статистики проанализированы 217 плавок стали марок 38ХЭСНМФА и ШХ15 текущего производства на Челябинском металлургическом заводе. Математическую обработку данных текущего контроля металла открытой выплавки и после рафинирующих

переплавов производили с помощью электронно-вычислительной машины "Минск-22".

Оценивали влияние длительности восстановительного периода, массы слитка, содержание элементов на загрязненность переплавленного металла неметаллическими включениями (оксидами, глобулами, силикатами, сульфидами), а также на механические свойства металла, и сравнивали степень влияния технологических параметров плавки исходного металла на средний из средних балл неметаллических включений в исходном металле со степенью влияния этих же технологических параметров на средний из средних балл включений в металле ВДП и ЭШП. Из всех изучаемых факторов с точки зрения возможности упрощения процесса наибольший интерес представляло исследование влияния продолжительности восстановительного периода на загрязненность металла включениями.

Как показали расчеты, после переплава сила влияния большинства технологических факторов выплавки исходного металла на загрязненность металла неметаллическими включениями убывает. По-видимому, это происходит вследствие появления новых факторов, влияющих на загрязненность металла включениями. Изменение длительности восстановительного периода в пределах от 60 до 115 минут практически не влияет на загрязненность исходного и переплавленного металла неметаллическими включениями.

В связи с этим сделан вывод, что проведение длительного восстановительного периода при выплавке металла для расходуемых электродов не обязательно. За счет сокращения длительности восстановительного периода производительность дуговых электропечей можно увеличить без ухудшения качества металла после ЭШП и ВДП. Конечное содержание включений в электрошлаковом металле в большей степени, как показали наши эксперименты, определяется режимом раскисления исходного металла, в частности, типом раскислителя. Наиболее полно при ЭШП и ВДП происходит очищение металла в том случае, если он раскислен алюминием и основная масса кислорода связана в высокоглиноземистые алюминаты.

На основании этого предложена и опробована технология выплавки исходного металла конструкционной стали марок ЭОХГСА и ЭОХМСА с сокращенным восстановительным периодом.

Металл выплавляли в 10-тонной дуговой электропечи на свежей шихте с полным окислением. После скачивания окислительного шлака произвели осадочное раскисление (3 кг/т на стали 30ХГСА) или раскисление и легирование (15 кг/т на стали 38ХМКА) металла в печи. После расплавления легирующих и шлакообразующих добавок металл сливали в ковш вместе со шлаком. Продолжительность восстановительного периода при этом составила 30-35 минут. Переплавы стали осуществляли на установках ЭМП и ВДП по технологии, принятой на заводе. Контроль химического состава металла показал стабильное и высокое усвоение всех легирующих добавок. Результаты контроля качества металла свидетельствовали о значительном снижении при переплаве содержания кислорода и окисных включений. По всем характеристикам металл, выплавленный по опытной технологии и подвергнутый рафинирующему переplаву, удовлетворял требованиям технических условий. Условный экономический эффект от повышения производительности печей и снижения расхода электроэнергии и ферросплавов составил 20 тыс. рублей.

Выводы

1. Основное количество кислорода при ЭМП хорошо раскисленного металла удаляется в виде неметаллических включений механическим путем.
2. Степень рафинирования металла от включений - продуктов раскисления в значительной мере определяется типом применяемого раскислителя.
3. Лимитирующей стадией в процессе удаления продуктов раскисления является доставка неметаллических включений к межфазным границам металл - шлак.
4. Существенная разница условий выделения включений при ЭМП и ВДП объясняется разной толщиной пленки подплавленного металла на торце расходоуемого электрода.
5. В процессе ЭМП на стадии пленочного течения металла лучше удаляются включения глинозема, имеющие более высокую плотность и сложную форму. Удаление сравнительно легких сферических включений кремнезема происходит преимущественно путем всплыва-

ния и продолжается на всех последовательных стадиях рафинирования.

6. Содержание кислорода в расходных электродах практически не влияет на его содержание в переплавленном (на ЭШП и ВДП) металле.

7. Влияние состава флюса на природу окисных включений проявляется вследствие восстановления из него сильных раскислителей (алюминия, кальция, магния) и последующего взаимодействия с включениями, переходящими в наплавляемый слиток из исходного металла и растворенным в металле кислородом.

8. Расположение включений в дендритной структуре не может однозначно характеризовать время их образования. Вероятность вхождения в дендриты металла включений кремнезема определяется временем их сосуществования в затвердевающих объемах расплава. Вхождение в растущие дендриты металла включений корунда определяется другими факторами, по-видимому, взаимной ориентацией их кристаллических решеток.

9. Найдены прямые экспериментальные доказательства присутствия в неизменном или трансформированном виде первичных продуктов раскисления в стали, подвергнутой рафинирующему переплаву (ЭШП или ВДП), а также образования включений в двухфазной зоне на границе раздела твердой и жидкой фаз.

10. Статистическая обработка данных текущего контроля показала, что в изученных пределах (от 60 до 115 минут) длительность восстановительного периода при выплавке исходного металла в открытых дуговых электропечах не оказывает существенного влияния на загрязненность металла ЭШП и ВДП неметаллическими включениями.

11. Предложена и опробована технология выплавки исходного металла стали марок 30ХГСА и 38ХМДА для рафинирующих переплавов (ЭШП и ВДП) с сокращением восстановительным периодом, которая позволяет значительно (в 2-3 раза) сократить длительность восстановительного периода и получить после переплава металла достаточно высокого качества, вполне удовлетворяющий требованиям технических условий.

