

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Гимадеев Шамиль Николаевич

ФОРМИРОВАНИЕ И ПОВЕДЕНИЕ ПРОДУКТОВ РАСКИСЛЕНИЯ
В ПРОЦЕССЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛА

Специальность 05.16.02 - "Металлургия черных металлов"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель – заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственной премии УССР, доктор технических наук, профессор Д.Н. ПОВОЛОЦКИЙ.

Научный консультант – доктор технических наук, доцент В.Е. РОШНИ.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор А.Н. МОРОЗОВ ;
кандидат технических наук Ю.В. КОФМАН.


Ведущее предприятие – Институт металлургии УИЦ АН СССР.

Защита состоится "15" октября 1980 года, в 14 часов, на заседании специализированного совета К-053.13.03 в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола (454044, г.Челябинск, проспект им. Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Автореферат разослан "4" сентября 1980 г.

Ученый секретарь специализированного совета
кандидат технических наук, доцент

 О.К. ТОКОВОЙ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Одним из основных показателей качества металла, определяющим его технологические свойства и служебные характеристики металлоизделий, является загрязненность неметаллическими включениями. Наиболее распространенным видом неметаллических включений являются оксидные включения — продукты раскисления, вызывающие ухудшение свойств стали, образование в ней дефектов и являющиеся причиной отбраковки металла.

Вопросы образования и удаления продуктов раскисления, образующихся в жидком металле, в значительной мере изучены. В последние годы предметом особого внимания исследователей являются вопросы образования и поведения включений при затвердевании металла. Это обусловлено тем, что загрязненность включениями готового металла определяется не только степенью удаления продуктов раскисления из жидкого металла, но и в значительной степени процессами их образования при кристаллизации расплава, так как кристаллизационные включения из металла практически не удаляются. Между тем, эти включения являются и наименее изученными, что объясняется не только трудностью исследования высокотемпературных процессов, но и сложностью отделения кристаллизационных включений от докристаллизационных. Поэтому изучение формирования и поведения продуктов раскисления в процессе кристаллизации металла весьма актуально.

Работа выполнена согласно координационным планам исследований научного совета АН УССР по проблеме "Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах" и постоянно действующего семинара "Сталь и неметаллические включения" МЧМ СССР.

Цель работы. 1. Разработать методику эксперимента, позволяющую обособить кристаллизационные включения — продукты раскисления от докристаллизационных.

2. Исследовать поведение докристаллизационных неметаллических включений на фронте кристаллизации железа и изучить факторы, определяющие распределение взвешенных в расплаве частиц в литой структуре металла.

3. Изучить природу и распределение кристаллизационных окисных включений.

4. Исследовать влияние степени раскисленности и параметров затвердевания металла на количество и размер кристаллизационных продуктов раскисления, а также на количество кислорода, связываемого раскислителями в эти включения.

Научная новизна. Разработана методика эксперимента, обеспечивающая обособление взвешенных частиц от зоны кристаллизации расплава, которая позволила идентифицировать кристаллизационные включения – продукты раскисления. Изучены форма, состав этих включений и распределение их в литой структуре металла. Экспериментально определено количество связываемого раскислителями (марганцем, кремнием или алюминием) в кристаллизационные включения кислорода в зависимости от условий кристаллизации металла и степени его раскисленности.

Экспериментально изучено вращение взвешенных в расплаве неметаллических включений в кристаллы железа. Показано, что при прочих равных условиях количество захватываемых кристаллами железа включений зависит от структурного и размерного соответствия плоских решеток этих фаз.

Практическая ценность. Результаты работы дают теоретическое объяснение закономерностей поведения наиболее распространенных типов продуктов раскисления при кристаллизации металла. Они могут быть использованы металлургическими заводами при совершенствовании технологии раскисления металла, в частности, при выплавке металла, предназначенного для последующих рафинирующих переплавов.

Результаты использованы при отработке технологии раскисления исходного металла для ЭШП и ВДП при выплавке его в дуговых печах Челябинского металлургического завода. Условный экономический эффект за счет сокращения восстановительного периода и повышения качества металла в результате совершенствования технологии раскисления составил 35 тыс. руб.

Апробация. Основные материалы и положения диссертации доложены на Второй Всесоюзной конференции "Современные проблемы электрометаллургии стали" (Челябинск, 1974 г.), Третьем Всесоюзном семинаре "Адгезия и взаимодействие расплавов с твердыми фазами и пайка материалов" (Томск, 1977 г.), Восьмой Всесоюзной конференции "Физико-химические основы производства стали" (Москва, 1978 г.), Восьмой Всесоюзной научно-технической конференции "Физико-химические и теплофизические процессы кристаллизации стальных слитков" (Киев, 1978 г.), научно-техническом семинаре кафедры металлургии стали ЧПИ (Челябинск, 1979 г.).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 5 статьях и тезисах докладов Всесоюзных конференций.

Объем. Диссертация изложена на 103 страницах машинописного текста и состоит из 5 глав с 7 отдельными таблицами, 29 рисунков. Список использованной литературы состоит из 130 наименований.

Методика исследования

Задачами исследования предусматривалось изучение процессов взаимодействия докристаллизационных продуктов раскисления с растущими из расплава кристаллами и формирования кристаллизационной окисной фазы. Одновременное присутствие в твердом металле докристаллизационных и кристаллизационных включений затрудняет получение требуемой информации. Поэтому при постановке экспериментов необходимо было обеспечить уменьшение до минимума содержание в металле кристаллизационных оксидов, что позволило бы произвести оценку распределения в дендритной структуре металла только докристаллизационных включений. В другом случае необходимо применить такую методику, которая позволила бы удалить докристаллизационные включения и исследовать кристаллизационные продукты раскисления.

Подобные исследования можно провести только в лабораторных условиях, поскольку в условиях промышленного производства практически невозможно в широком диапазоне изменять скорость кристаллизации металла, осуществлять эксперименты с остановкой фронта кристаллизации, кристаллизовать слиток с перемещением фронта кристаллизации направленно, например, вниз или вверх, устранить конвективный массообмен у границы раздела твердого и жидкого металла.

Расплавление и кристаллизацию металла проводили в огнеупорном капилляре. При наличии высокотемпературного нагревателя в капилляре можно расплавить небольшой объем металла и кристаллизовать его в любом направлении с требуемой скоростью. В капилляре с внутренним диаметром 5-6 мм практически отсутствует конвективное движение.

Для проведения опытов на базе печи Таммана была собрана вертикальная установка зонного переплава. Конструкция нагревателя и наличие холодильника позволяли получать узкую (порядка 5 мм) зону высокой температуры, создавать большой градиент температуры на границе твердого металла с жидким, что обеспечивало ориентированный рост кристаллов из расплава. Наличие электромеханического привода позволяло перемещать зону жидкого металла по образцу вверх (в направлении всплывания включений) или вниз (навстречу всплывающим включениям) с заданной скоростью.

На первом этапе изучали перераспределение взвешенных в расплаве включений при направленном росте кристаллов железа. В качестве объекта исследования использовали включения SiO_2 , Al_2O_3 , MnO , ZrO_2 или TiN в восстановленном водороде железе. Для получения окисных включений расплавленное в печи Таммана в алундовом тигле железо

раскислили при температуре 1600°C большим количеством раскислителя. Для более четкого выявления дендритной структуры перед присадкой раскислителя в расплав вводили 0,2% углерода. Включения нитрида титана получали одновременным введением в расплав азота в виде азотированного феррохрома и металлического титана. Для получения δ -железа в расплав присаживали хром на 2%, а δ' -железо получали добавками 10% никеля.

Образцы в виде прутков диам. 4 мм уплотняли мелкозернистым порошком окиси магния в алундовом капилляре, крепили к штоку установки зонного переплава и при помощи электромеханического привода перемещали вниз (вариант 1) или вверх (вариант 2) через кольцевую высокотемпературную зону со скоростью 5 и 10 мм/мин, а также с остановками на 3 мин. через 10 мм. В рабочей зоне нагревателя в течение опыта поддерживали температуру 1650°C. Переплавленные образцы шлифовали вдоль оси. Шлифы с отмеченными призмой микротвердомера включениями травили на выявление дендритной структуры и определяли количество включений в осях дендритов и межосных участках.

Учитывая, что кислород при отсутствии раскислителей, а также сера в чистом железе связываются железом во включения только при кристаллизации расплава, а азот в присутствии титана формирует включения преимущественно на начальной стадии кристаллизации, первоначально попытались оценить поведение растворенных примесей (кислорода и серы) и образующихся в расплаве включений нитридов титана в условиях зонного переплава металла.

Предварительные эксперименты с переплавом по изложенной выше методике нераскисленного восстановленного железа показали, что растворенные в металле сера и кислород диффундируют от фронта кристаллизации в жидкую фазу, независимо от направления перемещения зоны (вниз или вверх) скапливаются в объемах, кристаллизующихся в последнюю очередь, и выделяются там в виде включений FeS и FeO , расположенных сплошной сеткой по границам зерен. Аналогичные эксперименты с добавлением в железо азота на 0,1% и титана на 0,4% выявили заметную разницу в распределении включений TiN в зависимости от направления движения зоны.

Движение зоны вниз со скоростью 0,65 мм/мин привело к равномерному распределению нитридов по высоте образца. При перемещении зоны с той же скоростью в противоположном направлении в месте ее остановки обнаруживали скопления грубых нитридов. Это различие обусловлено, очевидно, перемещением вместе с зоной расплавленного металла взвешенных в нем включений в случае, когда направления

движения зоны и всплывания включений совпадают, и подавлением процесса их всплывания при противоположном направлении переплава.

Обособление крупных включений TiN у верхней границы перемещающейся жидкой зоны показало возможность отделения всплывающих докристаллизационных включений от кристаллизационных, что важно для изучения последних.

Для выяснения влияния скорости затвердевания на размеры выделяющихся при кристаллизации включений переплаву с разной скоростью перемещения зоны вниз подвергли чистую по неметаллическим включениям шарикоподшипниковую сталь ШХ15 вакуумно-дугового переплава с повышенным (0,07%) содержанием серы и образцы железа с титаном после предварительного двойного переплава их со скоростью движения зоны 0,65 мм/мин вверх для удаления докристаллизационных нитридов. При увеличении скорости переплава от 0,65 до 5,0 мм/мин расстояние между включениями FeS уменьшилось в 3 раза, в то время как размер включений практически не изменился.

Травлением металла на выявление дендритной структуры и зернистого строения обнаружено преимущественное расположение включений в междендритных участках. При этом включения FeS , расположенные непосредственно на границе зерен были деформированы, а расположенные там же включения TiN имели ярко выраженную кристаллическую форму. Различие формы включений свидетельствует о том, что в момент окончательного затвердевания металла сульфиды железа были жидкими или пластичными, а нитриды титана твердыми.

Учитывая результаты этих предварительных экспериментов образцы из восстановленного железа с разным содержанием раскислителя для рафинирования от докристаллизационных включений подвергли предварительному переплаву перемещением зоны жидкого металла вверх по образцу. Металл, раскисленный марганцем или кремнием, переплавили со скоростью 0,2 мм/мин, а раскисленный алюминием — 0,1 мм/мин. После остановки зоны, не отключая печь и не отступая от места остановки, все образцы подвергли рабочему переплаву, перемещая зону вниз со скоростью 0,5; 1,0 или 5,0 мм/мин (вариант А). В другой серии опытов образцы подвергли двухкратному предварительному переплаву. После окончания повторного переплава металл охладили до твердого состояния и отступив от места остановки зоны 20 мм образец вновь переплавили перемещением зоны вниз со скоростью 5,0 или 0,5 мм/мин (вариант Б).

Таблица

Распределение включений в литой структуре железа

Количество включений				Расчет сопряжения решеток		
в осях		между осями		Сопрягающиеся плоско- сти включений и железа	Размерное несоот- ветствие $\Delta, \%$	
шт./мм ²	%	шт./мм ²	%			
9,9	49,8	10,0	50,2	(100) β - SiO_2 (100) δ -Fe	6,5	
6,1	12,5	42,8	87,5	(1010) α - Al_2O_3 (110) δ -Fe	13,0	
3,8	69,7	1,7	30,3	(110) MnO (110) δ -Fe	3,0	
15,1	35,4	27,5	64,6	(110) ZrO_2 (110) δ -Fe	14,3	
13,1	56,2	10,2	43,8	(110) ZrO_2 (111) δ -Fe	6,4	
17,3	78,7	4,7	21,3	(111) TiN (110) δ -Fe	1,3	
25,4	50,7	24,8	49,3	(111) TiN (111) δ -Fe	7,0	

Согласно теории ориентированной кристаллизации критическое несоответствие (Δ) периодов ячеек можно считать равным минус плюс 12%. Как видно из данных, приведенных в табл., в общем наблюдается хорошая корреляция между результатами расчетов размерного несоответствия решеток и опытными данными определения места расположения включений относительно дендритной структуры железа.

Различный характер взаимодействия разных типов включений с дендритами железа обусловлен, по-видимому, их кристаллическим строением. Согласно расчету кристаллические решетки β - SiO_2 и MnO имеют хорошее геометрическое совпадение с решеткой δ -Fe ($\Delta = 6,5$ и 3,0% соответственно), поэтому контакт включений SiO_2 или MnO с кристаллами Fe может приводить к их срастанию, а вероятность встраивания SiO_2 в кристаллы Fe возрастает с увеличением продолжительности их контакта. Срастание α - Al_2O_3 с кристаллами δ -Fe представляется маловероятным ($\Delta = 13,0$), о чем свидетельствуют данные эксперимента. Основная масса частиц корунда сосредоточена в межосных участках, а на долю осей их приходится всего 12,5%, т.е. включения корунда преимущественно отщепляются поверхностью растущих кристаллов железа в межосное пространство.

Полученные на основании экспериментов с включениями SiO_2 , Al_2O_3 и MnO выводы подтверждаются результатами экспериментов с включениями ZrO_2 и TiN . Эти частицы чаще оказываются захвачен-

ными осями дондритов той модификации железа, с решеткой которого для них лучше выполняется принцип размерного соответствия (табл.).

Врастание взвешенных в расплаве включений в формирующиеся при кристаллизации стали кристаллы железа является, безусловно, сложным физико-химическим процессом и определяется целым рядом факторов. Результаты данной работы свидетельствуют о том, что сравнительную оценку вероятности захвата включений кристаллами железа или оттеснения их в межосные промежутки можно производить на основе принципа структурного и размерного соответствия плоских решеток сопрягающихся фаз.

Исследование кристаллизационных продуктов раскисления железа марганцем, кремнием или алюминием

Изучение продольных микрошлифов из образцов железа с раскислителем, переплавленного по вариантам А и Б показало, что верхняя граница продвижения зоны жидкого металла при предварительном переплаве всегда обозначена наличием небольшого по высоте (300–600 мкм) слоя из всплывших продуктов раскисления.

Ниже слоя всплывших включений присутствовали только глобулы, размер которых не превышал 7 мкм. Лишь иногда при сравнительно высоком содержании в металле алюминия (около 0,01%) на переплавленных участках наряду с глобулами обнаруживали отдельные мелкие (3–4 мкм) включения в виде кристаллов.

При одинаковых условиях опыта не обнаружили влияния содержания марганца или алюминия в металле на форму этих включений, что, однако, обнаруживается в образцах с кремнием, когда при малых (0,05–0,15%) концентрациях кремния включения были деформированными, а при более высоких (0,2–0,7%) имели сферическую форму.

Сферическая форма свидетельствует о выделении включений в жидком виде. Наличие жидких окислов, которые отвечали бы по составу SiO_2 или Al_2O_3 , в затвердевающем расплаве возможно. Однако образование жидких включений Al_2O_3 в условиях эксперимента представляется невероятным. В связи с этим продукты раскисления алюминием были подвергнуты детальному исследованию на определение фазового и химического состава.

Установлено, что в образцах, раскисленных марганцем или кремнием, преобладают включения на основе растворов закиси железа и окисла раскислителя. В случае раскисления алюминием наряду с такими включениями и включениями корунда в значительном количестве встре-

чаются окислы системы алюминий-кислород с дефицитом (по отношению к корунду) кислорода. Фазовый анализ выявил в составе включений Al_2O_3 и субокись Al_2O , причем включения субокислов алюминия встречаются не только в одном образце с включениями алюминатов железа, но часто даже на незначительном расстоянии от них.

Травлением микрошлифов выявили специфическое расположение включений в дендритной структуре металла. Независимо от типа раскислителя (Mn , Si или Al), его концентрации, а также скорости кристаллизации металла продукты раскисления в основном располагались между осями дендритов. Лишь незначительная часть включений примыкала к осям; в осях же дендритов включений не обнаруживали.

Обособление взвешенных в расплаве включений в виде четкого слоя у верхней границы перемещения зоны жидкого металла, последствия переплава, проявляющиеся в существенном различии морфологии всплывших и ниже по образцу расположенных включений, преимущественное расположение последних в междендритных участках позволили классифицировать обнаруживаемые на микрошлифах ниже слоя всплывших частицы окислы как кристаллизационные продукты раскисления.

По количеству и размерам включений с учетом их состава рассчитали количество связанного в кристаллизационные включения кислорода. При расчетах воспользовались соотношениями

$$O_{\text{факт}}^{\text{вкл}} = N_{\text{об}}^{\text{вкл}} \frac{\rho_{\text{вкл}} \pi O_2}{\rho_{\text{мет}} M_{\text{вкл}}} \% \quad (2)$$

$$N_{\text{об}}^{\text{вкл}} = \frac{4\pi}{3} \frac{(1,1931)^3 \sum r^3}{2 r_{\text{ср}} S} \cdot 100 \% \quad (3)$$

где $O_{\text{факт}}^{\text{вкл}}$ - количество связанного в кристаллизационные включения кислорода; $N_{\text{об}}^{\text{вкл}}$ - объемная доля включений в металле; $\rho_{\text{мет}}$ и $\rho_{\text{вкл}}$ - плотность металла и включений, г/см³; πO_2 - молярная масса кислорода во включении, г/моль; $M_{\text{вкл}}$ - молекулярная масса включения, г/моль; S - просматриваемая площадь шлифа, см²; $r_{\text{ср}}$ - средний радиус включений, см; $\sum r^3$ - сумма кубов радиусов видимых на шлифе включений, см³; 1,1931 - поправочный коэффициент, учитывающий возможность среза включения плоскостью шлифа не по центру.

Результаты расчета приведены на рис. I. Там же для сравнения приведены данные расчета количества кислорода, которое может быть связано в кристаллизационные включения. Расчетное количество связанного в кристаллизационные включения кислорода определяли как

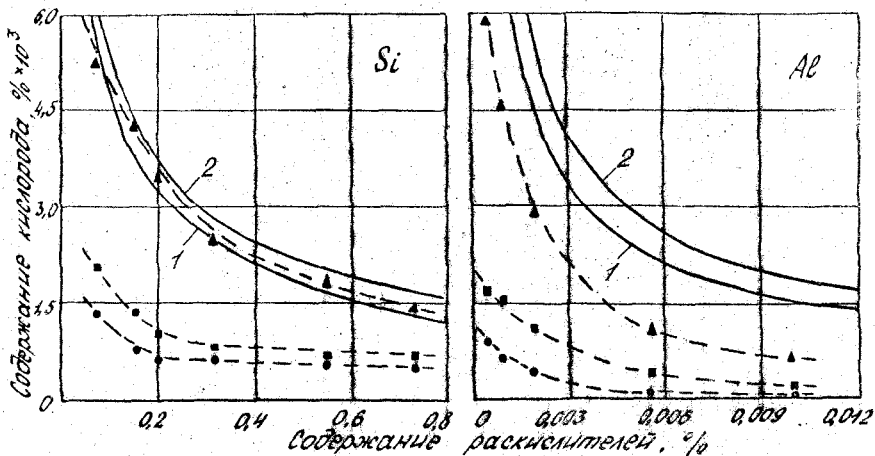


Рис. 1. Изменение содержания кислорода в кристаллизационных продуктах раскисления железа кремнием или алюминием: 1, 2 - расчетное в виде кристаллизационных включений при интервале кристаллизации 10° и 30° соответственно; ●, ■, ▲ - фактическое в составе кристаллизационных включений при скорости движения зоны 0,5; 1,0; 5,0 мм/мин соответственно

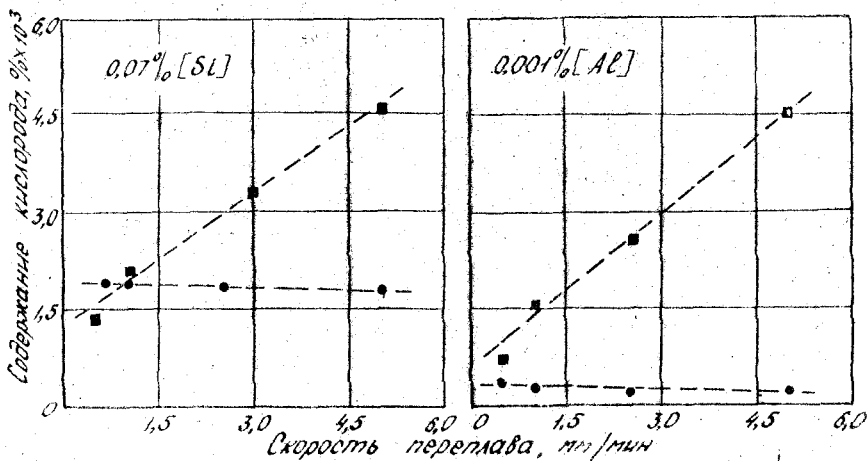


Рис. 2. Влияние скорости переплава железа на количество кислорода, связанного кремнием или алюминием в кристаллизационные включения. Варианты переплава: ■ - А, ● - Б

$$O_{\text{расч}} = (a_{\text{ликв}} - a_{\text{сол}}) + (a_{\text{сол}} - \gamma a_{\text{сол}}) \%, \quad (4)$$

где $a_{\text{ликв}}$ и $a_{\text{сол}}$ — активность кислорода при температурах ликвидуса и солидуса; γ — коэффициент уменьшения растворимости кислорода в металле в процессе кристаллизации при фиксированном содержании раскислителя. Значения $a_{\text{ликв}}$, $a_{\text{сол}}$ рассчитали по температурной зависимости констант реакций окисления Mn , Si или Al .

Однако термодинамический расчет не учитывает ликвацию примесей. Оценка структурных составляющих на травленных шлифах из переплавленной в огнеупорном капилляре стали ШХ15 показала, что при изменении скорости переплава от 0,5 до 5,0 мм/мин характер кристаллизации изменяется от ячеистого до дендритного, а объем межосных промежутков возрастает более чем в пять раз (с 5,2% до 27,6%). Примерно так же возрастало количество связанного в кристаллизационные включения кислорода (рис.1). Это указывает на то, что количество выделяющейся при кристаллизации металла окисной фазы зависит от степени развития диффузионных процессов у фронта кристаллизации.

При повышении скорости затвердевания трехкомпонентного расплава, содержащего железо, кислород и раскислитель, вследствие подавления зональной и развития внутрикристаллической ликвации происходит обогащение реагентами объемов маточного раствора. При этом концентрация реагентов превышает равновесную для температур затвердевания, и тогда происходит выделение кристаллизационной окисной фазы. Об этом свидетельствует расположение экспериментальных кривых на рис.1. Действительно, разность в количестве кислорода в составе кристаллизационных продуктов раскисления железа при неизменном содержании в металле раскислителей и кислорода с увеличением скорости кристаллизации заметно возрастает.

Особенно ярко влияние скорости проявляется при малых концентрациях раскислителей, когда условия диффузии реагентов обеспечивают их перемещение на значительные расстояния — зональную ликвацию. В области более высоких концентраций реагентов незначительное повышение их концентрации у фронта кристаллизации оказывается достаточным для выделения включений, в результате чего они не могут диффундировать на значительные расстояния, и влияние скорости продвижения фронта кристаллизации ослабевает. Следовательно, увеличение количества кристаллизационной окисной фазы связано с подавлением зональной ликвации реагентов.

Различное влияние скорости переплава на количество кристаллизационной окисной фазы (рис.2) обусловлено, по-видимому, разным со-

держанием кислорода в реакционных зонах, что достигалось специфическими условиями эксперимента. Поскольку в экспериментах по варианту А в процессе предварительного и рабочего переплава кристаллизовали один и тот же объем металла, изменяя при этом только направление переплава, то у фронта кристаллизации перераспределялся весь растворенный в расплаве кислород. В зависимости от скорости кристаллизации этот кислород частично диффундирует в твердую и жидкую фазы и частично связывается в кристаллизационные включения.

В экспериментах, проведенных по варианту Б, после двухкратного предварительного переплава ликвационная зона и в ней часть кислорода оставались выше начала рабочего переплава. Поэтому концентрация кислорода в реакционных зонах двухфазной области могла быть ниже равновесной для температур затвердевания. Появление тенденции не к уменьшению, а увеличению количества кристаллизационной окисной фазы с понижением скорости кристаллизации, по-видимому, обусловлено тем, что при начальных концентрациях реагентов, приближающихся к равновесным в затвердевшем металле, зональная ликвация не получает развития. В этих условиях повышение скорости затвердевания ослабляет развитие внутрикристаллической ликвации, в результате чего некоторое количество реагентов остается в виде пересыщенного раствора в твердом металле, и количество кристаллизационной окисной фазы уменьшается.

Следовательно, характер влияния скорости затвердевания металла на количество кристаллизационной окисной фазы определяется соотношением скоростей кристаллизации и диффузионного перераспределения реагентов между жидкой и твердой фазами на фронте кристаллизации. Вследствие реактивного характера диффузии повышение скорости затвердевания может сопровождаться как увеличением выделяющейся при кристаллизации окисной фазы (если концентрации реагентов достаточны для развития зональной ликвации), так и его уменьшением (когда концентрации реагентов в металле близки к равновесным с твердым металлом).

Таким образом, количество связываемого раскислителями в кристаллизационные включения кислорода зависит от условий кристаллизации металла и степени его раскисленности.

Поведение окисных включений при затвердевании металла в водоохлаждаемом кристаллизаторе

Исходный металл выплавили в 10-тонной дуговой печи. На плавах малоуглеродистого (0,09%) железа после полного окисления при-

месяц в электропечи металл при температуре 1620–1630°C сливали в нераскисленном состоянии в ковш. Металл разливали в изложницы емкостью 1250 кг и по ходу разливки раскисляли либо гранулированным алюминием в количестве 10 кг/т, либо 75%-ным из расчета 6 кг кремния на 1 т стали. Слитки проковали на расходоуемые электроды и подвергли электрошлаковому или вакуумно-дуговому переплаву. Из наплавленных слитков вырезали поперечные темплеты и изготавливали микрошлифы из осевой части, на половине радиуса слитка и краевой зоны.

Переплав раскисленного алюминием металла в вакууме позволил отчетливо выявить наследственную связь части докристаллизационных включений Al_2O_3 в исходном и переплавленном металле. В исходном металле одной плавки были получены включения Al_2O_3 очень своеобразной скелетной формы и темные глобулярные включения алюминатов железа. Своеобразная форма включений Al_2O_3 сохранилась и после переплава, хотя относительное количество скелетных включений уменьшилось, а глобулярных возросло. По-видимому, часть неизометричных включений Al_2O_3 удалась при переплаве. Характерных наследственных признаков кремнистых включений в переплавленном металле обнаружить не удалось, по-видимому, вследствие их значительной диссоциации.

Наследственный характер части включений проявлялся и при ЭШП, но менее ярко, чем при ВДП, что, по-видимому, обусловлено трансформацией докристаллизационных включений в результате обменных реакций с компонентами шлака.

Между тем, изучение металла ЭШП, в котором количество включений было заметно больше, чем в металле ВДП, позволило отчетливо выявить распределение различающихся по времени образования оксидных включений по сечению слитка. В краевых зонах слитка наряду с кристаллами корунда (3–30 мкм) обнаруживали большое количество бесцветных глобулей (15–45 мкм), характерных для исходного металла. От края к центру относительное количество глобулей по отношению к идиоморфным включениям корунда снижалось, в центре же слитка глобулярных включений не обнаруживали. В центре слитка скорость кристаллизации наименьшая, что, очевидно, обеспечивает наиболее благоприятные условия для удаления всплыванием докристаллизационных продуктов раскисления. В то же время количество кристаллизационных оксидных включений от периферии к центру слитка возрастало. По-видимому, это закономерно, поскольку в том же направлении возрастает длительность кристаллизации металла, что, как было показано лабораторными иссле-

дованиями, сопровождается увеличением количества кристаллизационной оксидной фазы.

Результаты изучения распределения докристаллизационных продуктов раскисления в литой структуре металла ЭШП и ВДП показали, что независимо от вида переплава и размеров включений количество включений Al_2O_3 в осях дендритов в среднем на порядок меньше, чем в межосных участках, что достаточно хорошо коррелирует с данными лабораторных исследований и подтверждает вывод об оттеснении Al_2O_3 растущими кристаллами металла в объеме маточного раствора. В то же время включения SiO_2 в целом равновероятно обнаруживаются в осях и межосных участках, причем наиболее крупные включения располагаются преимущественно в осях дендритов. По-видимому, укрупнившиеся в двухфазной зоне включения SiO_2 успевают вырасти в оси дендритов. Действительно, наиболее крупные включения SiO_2 сосредоточены в центре слитков ЭШП и ВДП, где длительность кристаллизации наибольшая, и, следовательно, более благоприятные условия для срастания включений с растущими кристаллами матрицы.

Таким образом, наряду с наследственными первичными и кристаллизационными продуктами раскисления в наплавленных слитках ЭШП и ВДП присутствуют оксидные включения, сформировавшиеся в ванне кристаллизатора при охлаждении жидкого металла, причем доля наследственных включений невелика. Основная часть кислородных включений в металле рафинирующих переплавов представлена частицами, образовавшимися при охлаждении и кристаллизации металла. Характер распределения докристаллизационных включений в литой структуре наплавленных в водоохлаждаемом кристаллизаторе слитков хорошо согласуется с результатами лабораторной части исследований.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика эксперимента, позволяющая отделять кристаллизационные включения от докристаллизационных и изучать закономерности формирования кристаллизационных продуктов раскисления.

2. Изучены закономерности распределения взвешенных в расплаве включений в литой структуре железа. Экспериментально подтверждено, что захват или оттеснение этих включений растущими кристаллами железа зависит от структурного и размерного соответствия плоских решеток контактирующих фаз.

3. Впервые экспериментально изучено влияние условий кристаллизации и содержания раскислителя на количество, форму, размер, сос-

тав и распределение кристаллизационных продуктов раскисления.

4. Установлено, что при одинаковой степени раскисленности расплава с развитием внутрикристаллической ликвиации и подавлением зонального количества кристаллизационной оксидной фазы увеличивается.

5. Экспериментально установлено, что с увеличением в расплаве концентрации раскислителя количество кристаллизационной оксидной фазы уменьшается.

6. Показано, что установленные закономерности формирования и поведения кислородных включений в процессе кристаллизации металла в капилляре реализуются в реальных процессах рафинирующих переделов в промышленных условиях.

Основное содержание диссертации опубликовано
в работах:

1. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Кейс А.Н., Гимадеев Ш.Н., Гречин Р.И. Поведение кислородных включений у фронта затвердевания металла. - Тезисы докладов Второй Всесоюзной научной конференции по современным проблемам электрометаллургии стали, Челябинск, ЧМ, 1974.

2. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Кейс А.Н., Гимадеев Ш.Н., Гречин Р.И. Перераспределение взвешенных в расплаве включений при направленном росте кристаллов железа. - Известия вузов. Черн. металлургия, № 6, 1976, с. 61-65.

3. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Гимадеев Ш.Н., Грибанов В.П. Исследование третичных продуктов раскисления железа кремнием. - Известия АН СССР. Металлы, № 4, 1977, с. 56-61.

4. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Гимадеев Ш.Н. Исследование кристаллизационных включений - продуктов раскисления железа марганцем, кремнием или алюминием. - Тезисы докладов Восьмой Всесоюзной конференции по физико-химическим основам производства стали, Москва, Институт металлургии им. Байкова АН СССР, 1978.

5. Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Становнова Л.Б., Гимадеев Ш.Н. Срастание разнородных твердых фаз, возникающих в жидкой стали. - В сб. Совместимость и адгезионное взаимодействие расплавов с металлами, Киев, Институт проблем металловедения АН УССР, 1978, с. 139-145.