

На правах рукописи

ЛИХОЛОБОВ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВОЙ СТАЛИ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ПРОЦЕССА ЕЁ ПЛАВКИ И ВНЕПЕЧНОЙ
ОБРАБОТКИ**

Специальность 05.16.04. - "Литейное производство"

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2012

Диссертационная работа выполнена на кафедре технологии литейных процессов
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Научный руководитель: **Тен Эдис Борисович**, профессор каф. ТЛП НИТУ
МИСиС, доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Батышев Александр Иванович**, профессор Московского
открытого государственного университета, доктор техни-
ческих наук

Котельников Георгий Иванович, доцент НИТУ МИСиС,
кандидат технических наук

Ведущая организация: **ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»**

Защита состоится «22» ноября 2012 года в 10 часов на заседании диссертационного со-
вета Д.212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом университете
«МИСиС» по адресу: 119049, Москва, Ленинский проспект, д.6, корп.1, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС».

Автореферат диссертации размещен на официальном сайте НИТУ «МИСиС» –
<http://misis.ru>.

Текст автореферата и объявление о защите направлены для размещения в сети Интер-
нет Министерством образования и науки Российской Федерации по адресу
referat_vak@mon.gov.ru

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреж-
дения) просьба направлять по адресу: 119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, Ученый со-
вет.

Копии отзывов можно прислать по факсу: (495) 951–17–25, а также на e-mail: elicholo-
bow@mail.ru

Автореферат разослан «___» сентября 2012 года.

Ученый секретарь диссертационного
Совета Д.212.132.02

доктор технических наук, профессор



Семин А.Е.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Высокомарганцевые стали, содержащие 8,5-15 % марганца, благодаря высокой износостойкости при воздействии ударных нагрузок, уже многие годы остаются незаменимым конструкционным материалом для изготовления сменных деталей машин и оборудования в машиностроительной, горнорудной, металлургической, железнодорожной и других отраслях промышленности. Из этих сталей изготавливают футеровки вихревых и шаровых мельниц, трамвайные и железнодорожные крестовины и стрелочные переводы, гусеничные траки, звездочки, зубья ковшей экскаваторов и другие детали.

Наиболее массово износостойкие отливки изготавливают из высокомарганцевой стали марки 110Г13Л. Но в промышленности нашли применение экономно-легированный вариант – сталь 120Г10ФЛ, а также комплексно-легированные стали марок 110Г13ФТЛ, 110Г13ХБРЛ, 110Г13Х2БРЛ и 130Г14ХМФАЛ.

Потребность промышленности в отливках из высокомарганцевых сталей постоянно растет. При этом требования к ним повышаются, а цены на марганецсодержащие легирующие материалы имеют тенденцию к непрерывному росту. Поэтому актуальным являются как повышение качественных показателей отливок из высокомарганцевых сталей, так и снижение затрат на их изготовление. Такая комплексная задача может решаться разными методами. Одним из них является совершенствование технологии раскисления и модифицирования стали.

Качественное раскисление предполагает обработку стали минимально необходимым количеством раскислителя. Наиболее корректно это можно сделать, если владеть информацией о содержании растворенного кислорода. Это стало возможным благодаря созданию методики и средств измерения активности кислорода в жидкой стали с использованием датчиков на основе твердоэлектролитного кислородно-концентрационного элемента, в разработку которых большой вклад внесли ученые Московского института стали и сплавов (ныне НИТУ «МИСиС») - В.И. Явойский, В.П. Лузгин, А.Ф. Вишкарёв и др.

Технология плавки высокомарганцевых сталей обязательно включает диффузионное раскисление её в печи. Глубину его протекания контролируют по содержанию $\Sigma(\text{FeO}+\text{MnO})$ в предвыпускном шлаке. Это занимает достаточно много времени. Использование УКОС позволяет контролировать полноту диффузионного раскисления жидкой стали и обеспечить минимальный уровень её окисленности перед ковшовой обработкой расплава раскислителем и модификатором. В конечном итоге, это ведет к снижению расхода раскислителей и модификаторов, повышению чистоты стали по неметаллическим включениям и улучшению её качества. В случае контроля окисленности стали по активности кислорода становится воз-

возможным оперативное управление проведением восстановительного периода. Но для этого необходимо установить корректную связь между содержанием Σ (FeO + MnO) в шлаке и активностью кислорода в жидких высокомарганцевых сталях.

Технология выплавки высокомарганцевых сталей также обязательно включает конечное раскисление и модифицирование расплава в ковше. Как правило, для этого используют алюминий и титан. При этом важно обеспечить оптимальное остаточное содержание этих элементов. Это особенно важно для алюминия, так как высокомарганцевые стали склонны к насыщению азотом. При сочетании высокого содержания азота и алюминия в этих сталях образуются кристаллизационные пленочные нитриды AlN, которые существенно снижают показатели механических свойств, а также повышают склонность их к трещинообразованию. Нестабильность усвоения алюминия затрудняет возможность предотвращения этого процесса. Поэтому исследователями предпринимались попытки замены чушкового алюминия на другой раскислитель, который обеспечивал бы более стабильное усвоение алюминия. В качестве альтернативы рассматривался, в том числе, ферросиликоалюминий (ФСА). Однако широкое применение ФСА сдерживалось недостаточной его изученностью, в частности, отсутствием надежных сведений о фазовом строении, об оптимальном расходе, о степени усвоения алюминия и об образующихся при этом НВ. Отсутствуют также данные об эффективности его применения в комплексе с титаном.

Из изложенного следует, что проблема повышения качества стали на основе оптимизации процесса печного и внепечного раскисления высокомарганцевых сталей является актуальной.

Цель работы. Исследование активности кислорода в высокомарганцевых сталях и совершенствование технологического процесса их плавки и внепечной обработки для получения высококачественного литья.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе ставились следующие задачи:

- Проведение термодинамического анализа возможности экспрессной оценки Σ (FeO + MnO) в предвыпускном шлаке на основе измеренной активности кислорода в жидкой стали;
- Экспериментальная проверка возможности прогнозирования содержания Σ (FeO + MnO) в шлаке по активности кислорода в жидкой стали;
- Исследование фазового строения Fe-Si-Al лигатуры при различных температурах;
- Оценка эффективности замены металлического Al на лигатуру ФС45А15 при ковшовой обработке стали 110Г13Л;
- Разработка технологических рекомендаций для получения высококачественных отливок и опытно-промышленное опробование результатов работы.

Научная новизна

1. Теоретически предсказано и экспериментально подтверждено, что при выплавке высокомарганцевых сталей для производства износостойких отливок содержание Σ (FeO + MnO) в предвыпускном шлаке может быть с высокой надежностью спрогнозировано по активности кислорода $a_{[O]}$ и концентрации марганца [Mn] в расплаве, при этом связь между указанными параметрами описывается линейным уравнением: $(\text{MnO}) + (\text{FeO}) = a_{[O]} \cdot (180,3 + 706,8 \cdot [\text{Mn}])$.

2. Методами компьютерного моделирования по программе “TermoCalc” и металлографического анализа установлены закономерности изменения фазового строения ФСА в широком интервале температур, согласно которым в исходном состоянии он имеет трехфазное строение (твердый раствор на основе Si + FeSi + интерметаллид Al_xFe_y , затем перед полным расплавлением он трансформируется в двухфазную эвтектику (Si + FeSi).

3. Установлен факт усиления модифицирующего эффекта ковшовой обработки высокомарганцевой стали при замене комплекса (Al+Ti) на комплекс (ФСА+Ti), что может быть следствием запаздывания фазовых превращений при нагреве и плавлении ФСА, в результате которого к моменту кристаллизации стали в ней могут неравновесно присутствовать частицы интерметаллида Al_xFe_y , выполняющие роль дополнительных центров кристаллизации аустенита.

4. Установлены количественные зависимости показателей качества стали (остаточное содержание алюминия и титана, размер литого зерна, временное сопротивление разрыву, относительное удлинение и ударная вязкость) от варианта ковшовой обработки и расхода раскислителей (ФСА и Al) и модификатора (Ti).

Практическая значимость

1. Разработана серия (для разных концентраций марганца [Mn]) номограмм для прогнозирования $\Sigma(\text{FeO}+\text{MnO})$ в шлаке по измеренной активности кислорода в высокомарганцевом расплаве $a_{[O]}$, применение которой позволило оперативно контролировать степень раскисленности высокомарганцевых сталей перед выпуском из печи и повысить эффективность её ковшовой обработки.

2. Показано, что при выплавке стали 110Г13Л требуемым показателям раскисленности шлака $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq (4,5-6) \%$ соответствует активность кислорода $a_{[O]}$ в расплаве стали перед выпуском из печи на уровне $\leq 0,0003 - 0,0007 \%$.

3. Экспериментально установлено, что при ковшовой обработке стали 110Г13Л комплексом (ФС45А15+Ti) взамен комплекса (Al+Ti) достигается более высокое и стабильное усвоение алюминия и титана, измельчение литого зерна на 1-2 балла и повышение показателей механических свойств (ударной вязкости КСЧ на $\sim 12 \%$, временного сопротивления σ_b

на ~ 14 %, относительного удлинения δ_5 на ~ 55 %).

4. Методика оперативного контроля раскисленности предвыпускного шлака по данным измерения активности кислорода в жидкой стали внедрена в литейном цехе АО «Алюминий Казахстана» при производстве отливок из стали 110Г13Л.

5. По результатам широкого промышленного опробования получила реализацию технология ковшовой обработки стали 110Г13Л комплексом $\text{FC45A15} + \text{Ti}$, что обеспечило повышение качества отливок и получение экономического эффекта 102 руб/т (486 тенге/т) за счет снижения расхода раскислителя и модификатора.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на международных конференциях: «Прогрессивные литейные технологии», Москва, МИСиС (2011); «Гетерогенные процессы в обогащении и металлургии», Караганда, ХМИ им. Ж. Абишева (2011); «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан - 2030»», Караганда, КарГТУ (2011); «Металлургия Прииртышья в реализации программы форсированного индустриально-инновационного развития «Казахстан-2020», Павлодар, ПГУ им. С. Торайгырова (2011), а также на научных семинарах кафедры технологии литейных процессов НИТУ «МИСиС» (2009-2012).

По результатам диссертационной работы опубликовано 8 статей и тезисов докладов, а также получено одно Ноу-Хау.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 76 рисунков, 32 таблицы, состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы из 94 наименований и приложений.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1. Высокомарганцевая сталь как износостойкий сплав, особенности плавки и ковшовой обработки

Рассмотрены особенности химического состава высокомарганцевых сталей по действующим на данный момент ГОСТам и ТУ, а также нормативным документам зарубежных стран. На примере стали 110Г13Л рассмотрены также типичные структуры, технологические, механические и эксплуатационные свойства. Проанализированы работы, посвященные исследованию зависимости качественных характеристик высокомарганцевой стали 110Г13Л от технологии плавки, внепечной обработки, заливки и термической обработки. Наибольший вклад в исследование этой стали и особенностей изготовления отливок из нее внесли Ю.А. Шульте с сотрудниками, Н.Г. Давыдов, С.В. Житнов и др.

Анализ литературных источников и известных технических решений по улучшению

качества отливок из стали 110Г13Л позволяет сделать следующие выводы:

- важнейшим условием достижения высокого качества стали типа 110Г13Л является глубокая её раскисленность перед выпуском из печи, что соответствует низкому содержанию в шлаке оксидов железа и марганца: $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq (4,5-6) \%$;
- экспрессный метод контроля активности кислорода в жидкой стали пока не нашел применения при производстве отливок из высокомарганцевых сталей;
- уровень механических и эксплуатационных свойств стали в значительной степени зависит от количества и характера распределения неметаллических включений, при этом основной составляющей НВ в сталях, раскисленных алюминием, является глинозем и его сложные соединения;
- применяемая в настоящее время технология окончательного раскисления стали алюминием не является оптимальной в отношении чистоты по НВ, вследствие чего одним из путей повышения качества отливок из высокомарганцевых сталей представляется замена алюминия более эффективным раскислителем;
- имеются предпосылки применения вместо алюминия при ковшевом раскислении жидкой стали ФСА, однако это сдерживается тем, что практически не изучены его фазовое строение и влияние на качество высокомарганцевых сталей и отливок из них.

Из изложенного следует актуальность совершенствование технологии плавки и внепечной обработки высокомарганцевых сталей на основе экспрессного контроля их раскисленности и применения ФСА вместо алюминия при ковшовой обработке расплавов.

2.2. Методика проведения экспериментов

Объектом исследования являлась износостойкая сталь 110Г13Л. Плавку стали осуществляли в дуговой печи с основной футеровкой методом переплава или сплавления. В первом случае в качестве основного компонента шихты использовали возврат собственных отходов, а во втором – стальной лом 1А-4А, среднеуглеродистый ферромарганец ФМн88 и высокоуглеродистый ферромарганец ФМн78.

По расплавлению шихты наводили новый шлак присадками извести и плавленого шпата в соотношении 5:1, в количестве 12-14 кг на тонну металлозавалки. Корректировку состава жидкой стали осуществляли присадкой силикомарганца МнС17. Расплав перед выпуском раскисляли ферросилицием ФС45 в количестве 3,6 кг/т и затем выпускали из печи в 8-т стопорный ковш. Жидкую сталь обрабатывали в ковше путем присадки 0,06-0,08% алюминия вторичного АВ91 и 0,16% титана губчатого ТГ-ТВ. Опытные плавки отличались тем, что ковшовую обработку стали в ковше осуществляли 0,35% лигатуры ФС45А15 совместно с

0,16% губчатого титана.

Сталь разливали в формы при температуре 1440–1470 °С. По ходу разливки отливали пальчиковые пробы (черт.6 ГОСТ 977–88) для металлографических исследований и механических испытаний.

Макро- и микроструктуру образцов исследовали в литом и термообработанном состояниях. Термообработку (ТО) проб (закалку) осуществляли совместно с отливками путем нагрева в камерной печи до температуры 1050–1120 °С, выдержки в зависимости от наибольшего сечения отливок от 3 до 5 часов и охлаждения в барботируемой воде с температурой не более 40 °С с перемещением садки по вертикали и горизонтали не менее 7 минут.

Металлографические исследования шлифов проводили на оптическом микроскопе МИМ–8М, шлифы готовили из образцов на ударную вязкость. Размер аустенитного зерна оценивали баллом согласно ГОСТ 5639 (метод сравнения, шкала 3).

Фрактографические исследования изломов проводили на электронном микроскопе JSM-35CF фирмы Jeol. При этом использовали образцы после испытания их на ударную вязкость.

Микрорентгеноспектральный анализ проводили на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV.

Пробы для анализа газов отбирали из печи и из разливочного ковша путем засасывания жидкой стали в кварцевые трубки диаметром 5 мм с последующей закалкой в воде. Образцы для анализа вырезали из середины прутковых проб, участков с чистой поверхностью и без раковин.

Анализ на содержание кислорода и азота в образцах стали выполняли на установке ТС–600 фирмы «Лесо» методом восстановительного плавления (графитовый тигель) в импульсной печи сопротивления в токе инертного газа (гелий). Чувствительность метода – 0,00001 % по массе.

Активность кислорода измеряли, используя устройство УКОС ТЗ-900 ТУ 311-00226253.068 с датчиком окисленности стали ДОС-05-900 ТУ 311-00226253.067 на базе чувствительного элемента Zircomex (производства Японии).

Закись железа (FeO) и закись марганца (MnO) определяли по методикам АО «Алюминий Казахстана» СТ АО 00201974-20.062-2008 и СТ АО 00201974-20.063-2008 соответственно титриметрическим методом.

Содержание углерода определяли кулонометрическим методом по ГОСТ 12344–2003, серы – титриметрическим йодид-йодатным методом по ГОСТ 12345–2001. Содержание остальных элементов (Mn, Si, P, Cr, Al, Ti) определяли на спектрометре СРМ-25 рентгенофлуоресцентным методом.

Химический состав ферросиликоалюминия определяли на рентгеновском спектрометре Rigakusimuitix 3550.

Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497–84 на образцах диаметром 10 мм с пятикратной расчетной длиной (тип III №4) на машине ИР 6054-200-0.

Испытания на ударный изгиб для определения ударной вязкости проводили при комнатной температуре на образцах с концентратором U-образного вида по ГОСТ 9454–78 тип I на копре маятниковом ИО 5003-0,3.

Кроме того, использовали специальные методики исследования, их описания приведены в соответствующих разделах работы.

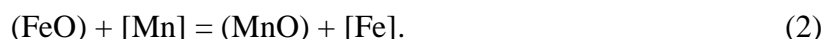
2.3 Исследование активности кислорода в высокомарганцевой стали и её связи с содержанием $\Sigma(\text{FeO}+\text{MnO})$ в предвыпускном шлаке

При выплавке стали 110Г13Л исключительное значение имеет качественное проведение восстановительного периода, реализация его при основности шлака $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) \geq 2,5$ и достижение предельного содержания в нем оксидов железа и марганца $\Sigma(\text{FeO}+\text{MnO}) \leq 4,5 \%$ при выплавке стали методом окисления и $\Sigma(\text{FeO}+\text{MnO}) \leq 6,0 \%$ при выплавке стали методами переплава или сплавления.

Требуемую основность шлака при плавке обеспечивают регулированием состава шлакообразующих присадок. Но содержание в нем оксидов железа и марганца уменьшают путем раскисления шлака. Для определения момента достижения в шлаке требуемого содержания $\Sigma(\text{FeO}+\text{MnO})$ необходимо периодически отбирать пробы и проводить их химический анализ. Поэтому традиционный метод контроля раскисленности шлака затратен и неоперативен.

В работе изучали возможность оперативной (экспрессной) оценки $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ путем измерения активности кислорода в жидкой стали. Для этого использовали расчетный и экспериментальный методы.

Расчетным путем зависимость $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ от активности кислорода находили на основе анализа термодинамики следующих двух реакций:



Из выражений констант равновесия этих реакций получили зависимость суммарного содержания оксидов железа и марганца в шлаке от активности кислорода и содержания марганца в стали:

$$(\text{MnO}) + (\text{FeO}) = a_{[\text{O}]} \cdot \{A + B \cdot [\text{Mn}]\}, \quad (3)$$

где (FeO) и (MnO) – соответственно содержания оксидов железа и марганца в шлаке;

$a_{[\text{O}]}$ – активность кислорода в жидкой стали, %;

A и B – коэффициенты, значения которых определяются следующими соотношениями:

$$A = K_{\text{FeO}} / \gamma_{\text{FeO}}; \quad (4)$$

$$B = (K_{\text{MnO}} \cdot K_{\text{FeO}} \cdot f_{[\text{Mn}]} / \gamma_{\text{MnO}}). \quad (5)$$

K_{FeO} и K_{MnO} – константы равновесия реакций (1) и (2) соответственно;

γ_{FeO} и γ_{MnO} – коэффициенты активности оксидов железа и марганца соответственно;

$[\text{Mn}]$ и $f_{[\text{Mn}]}$ – соответственно содержание марганца в жидкой стали и его коэффициент активности.

Коэффициенты A и B содержат в качестве параметров константы равновесия реакций (1) и (2), которые зависят только от температуры, а также коэффициенты активности γ_{FeO} , γ_{MnO} и $f_{[\text{Mn}]}$. Все они могут быть рассчитаны вполне корректно.

Расчеты, выполненные применительно к условиям плавки стали 110Г13Л (температура расплава $T = 1550^\circ \text{C}$, основность шлака $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2) = 2,5$), позволили рассчитать значения коэффициентов A и B и получить уравнение (3) в следующем виде:

$$(\text{MnO}) + (\text{FeO}) = a_{[\text{O}]} \cdot (180,3 + 706,8 \cdot [\text{Mn}]) \quad (6)$$

По формуле (6) оценили ожидаемые значения $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ при различной активности кислорода в жидкой стали. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние марганца на изменение $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ при различной активности кислорода в жидкой стали 110Г13Л

Активность кислорода $a_{[\text{O}]}$, %	Расчетные значения $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$, %, при содержаниях марганца $[\text{Mn}]$, %				
	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0
0,0003	2,49	2,60	2,81	3,02	3,23
0,0005	4,15	4,33	4,68	5,04	5,39
0,0007	5,82	6,06	6,56	7,05	7,55
0,0009	7,48	7,79	8,43	9,07	9,70

Из таблицы 1 следует, что при активности кислорода в жидкой стали $a_{[O]} = 0,0003$ % суммарное содержание оксидов железа и марганца $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ составляет 2,5 - 3,2 % при изменении содержания марганца в пределах 11,5 - 15,0 %. При увеличении активности кислорода до $a_{[O]} = 0,0005$, 0,0007 и 0,0009 % в тех же условиях $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ возрастает до 4,2 - 5,4, 5,8 - 7,6 и 7,5 - 9,7 %.

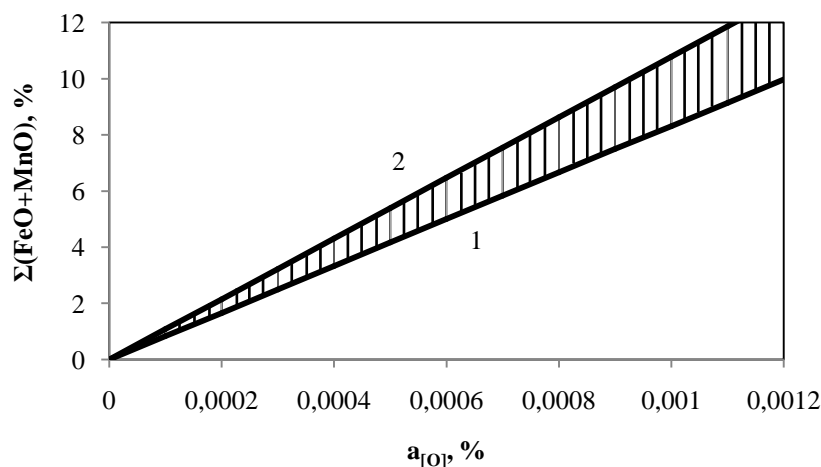


Рисунок 1 – Влияние активности кислорода в стали на $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ в шлаке при различном содержании в ней марганца
1 и 2 – содержание $[\text{Mn}]$ в стали 11,5 и 15,0 % соответственно.

На рисунке 1 представлена зависимость величины $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ в шлаке от активности кислорода $a_{[O]}$ в жидкой стали. Как видно, во всем диапазоне изменения содержания марганца в стали (от 11,5 до 15,0 %) на величину $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ оказывают влияние, как содержание марганца, так и активность кислорода, но роль последней является превалирующей. По-этому определение $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ по измеренным значениям активности кислорода $a_{[O]}$ с использованием соотношения (6) обеспечивает высокую надежность получаемых результатов – коэффициент корреляции $R = 0,98$.

При этом при выплавке стали методом окисления условие $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 4,5$ % достигается при активности кислорода $a_{[O]} \leq (4,1 - 5,5) \cdot 10^{-4}$ %, где нижнее и верхнее значения получаются при содержаниях марганца в стали соответственно на нижнем (11,5 %) и верхнем (15,0 %) пределах. При выплавке стали методом переплава и сплавления условие $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 6$ % в тех же условиях достигается при $a_{[O]} \leq (5,5 - 7,2) \cdot 10^{-4}$ %.

Экспериментально связь между $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ и активностью кислорода изучали путем отбора проб предвыпускного шлака и анализа в нем содержания (FeO) и (MnO), а также

данных измерений в этот же период активности кислорода и определения содержания марганца в пробах стали, отобранных параллельно пробам шлака.

Для определения $a_{[O]}$ применяли устройство УКОС ТЗ-900 с датчиком электрохимического элемента ДОС-05-900 из ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 с электродом сравнения $Mo - MoO_2$, размещенная внутри колпачка. При погружении датчика в жидкую сталь в нем вырабатывается ЭДС (Е, мВ), величина которой когерентна активности кислорода в расплаве. Значение активности кислорода $a_{[O]}$ (ppm) считывали со специального цифрового прибора «Сталь-4-RS-232».

Полученные экспериментальные данные $a_{[O]}$ и $\Sigma(FeO + MnO)$ сравнивали с расчетными значениями $\Sigma(FeO + MnO)$.

Анализ полученных результатов (таблица 2) показывает, что расчетные данные весьма близки к экспериментальным данным. Оценка средних отклонений расчетных и экспериментальных результатов по соотношению $\Delta \Sigma(FeO + MnO) = \{\Sigma(FeO + MnO)_{\text{эксп}} - \Sigma(FeO + MnO)_{\text{расч}}\} \cdot 100 / \Sigma(FeO + MnO)_{\text{эксп}}$ показала, что среднее отклонение $\Delta \Sigma(FeO + MnO)$ составило 4,6 %. Это свидетельствует о высокой надежности метода прогнозирования $\Sigma(FeO + MnO)$ по данным измерения активности кислорода $a_{[O]}$.

Таблица 2 – Результаты измерения активности кислорода в жидкой стали $a_{[O]}$ и экспериментальной и расчетной оценки $\Sigma(FeO + MnO)$

№ плав-ки	Результаты измерения $a_{[O]}$, %	Результаты анализа		$\Sigma(FeO+MnO)_{\text{расч}}$, %	$\Delta \Sigma(FeO + MnO)$, %
		[Mn], %	$\Sigma(FeO+MnO)_{\text{эксп}}$, %		
217	0,0004	11,5	3,44	3,34	2,91
123	0,0004	11,9	3,71	3,44	7,28
141	0,0004	12,0	3,71	3,50	5,66
206	0,0004	12,4	3,83	3,58	6,53
228	0,0005	11,3	4,44	4,11	7,43
197	0,0006	12,1	5,44	5,19	4,60
142	0,0006	12,5	5,65	5,39	4,60
128	0,0006	13,1	5,85	5,63	3,76
225	0,0007	11,8	6,05	5,88	2,81
116	0,0007	12,1	6,26	6,14	1,92
196	0,0007	12,7	6,54	6,35	2,91

Для наглядности данные таблицы 2 представлены в графическом виде (рисунок 2). Как видно, экспериментальные данные весьма хорошо согласуются с расчетными результатами.

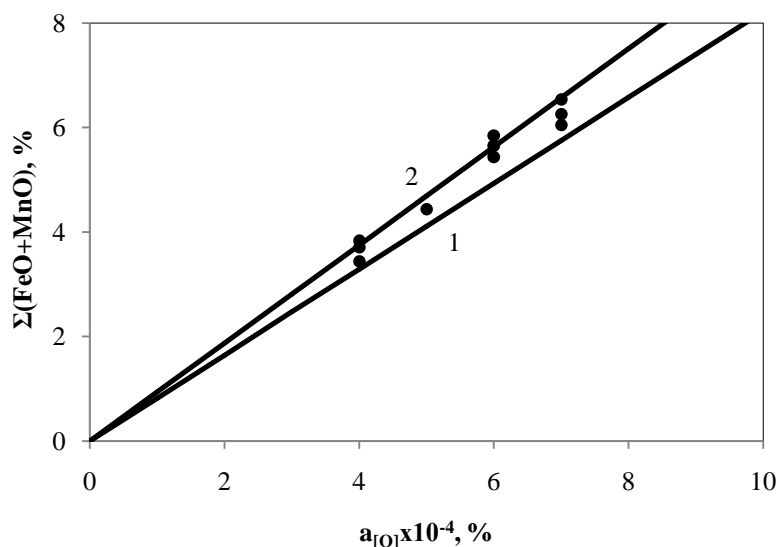


Рисунок 2 – Зависимость $\Sigma(FeO + MnO)$ в шлаке от активности кислорода в стали $a_{[O]}$

● – экспериментальные данные; 1 и 2 - рассчитанные по (6) зависимости при $[Mn]_{min} = 11,3 \%$ и $[Mn]_{max} = 13,1 \%$ соответственно.

Измерение активности кислорода в жидкой стали перед выпуском плавки в ковш показало, что она колеблется в широких пределах - от 0,0004 до 0,0009 %. При этом наиболее предпочтительные показатели раскисленности шлака $\Sigma(FeO + MnO) \leq (4,5-6) \%$ достигаются при активности кислорода $a_{[O]}$ в жидкой стали перед выпуском из печи на уровне 0,0003 - 0,0007 %. Это хорошо согласуется с приведенными выше расчетными данными.

Таким образом, расчетным путем и экспериментально определены уровни активности кислорода в жидкой стали в конце восстановительного периода и показана возможность оперативного контроля процесса плавки стали 110Г13Л путем прогнозирования $\Sigma(FeO + MnO)$ в шлаке на основе измерения активности кислорода в расплаве перед выпуском его из печи.

2.4 Исследование Fe-Si-Al лигатуры как заменителя металлического Al для ковшовой обработки стали 110Г13Л.

В работе изучали возможность снижения дефектности отливок и повышения их качества за счет повышения пластических свойств стали 110Г13Л, прежде всего, в литом состоянии. Наиболее эффективным и доступным методом её достижения является внепечная обработка, в частности, раскисление и модифицирование стали в ковше. При этом исходили из

того, что алюминий, обычно применяемый для конечного раскисления стали, усваивается расплавом нестабильно и потому в расплаве возможны локальные флуктуации его содержания. В микроразонах с повышенным содержанием алюминия, при прочих равных условиях, в затвердевающей отливке могут образоваться включения нитрида алюминия, которые в виде тонких пленок располагаются по границам зерен и снижают все показатели механических свойств.

С учетом изложенного, в работе для ковшовой обработки стали вместо металлического алюминия использовали ферросиликоалюминий марки ФС45А15 (таблица 3) производства Экибастузского ферросплавного завода.

Анализ химического состава ФСА показал, что, наряду с регламентируемым перечнем компонентов, в нем выявлено присутствие 1,06-1,36 % титана, 1,36-0,36 марганца, по 0,05-0,07 % кальция, хрома, меди и циркония, а также по 0,03-0,04 % кобальта и никеля.

Таблица 3 – Химический состав ферросиликоалюминия ФС45А15

Содержание элементов, %, массовая доля				
Si	Al	P	S	Fe
44,97 - 47,99	14,96 - 15,76	0,08 - 0,14	0,01	34,54 - 37,83

Структуру Fe-Si-Al лигатуры изучали с привлечением микрорентгеноспектрального анализа. Картированием по плоскости шлифа было получено многослойное изображение (рисунок 3).



Рисунок 3 – Многослойное изображение ФС45А15.

В структуре сплава отчетливо выделяются зерна чистого кремния 1, железо-кремниевая фаза 2, железо-алюминиевая фаза с различным содержанием алюминия 3, иногда встречаются легированные титаном участки двух последних фаз 4.

Фазовые превращения в Fe-Si-Al лигатуре изучали при помощи компьютерной программы Thermo-Calc, построив политермические разрезы для тройных Fe – Si – Al систем. При этом варьировали содержанием кремния в пределах 40-50 % и алюминия – 10-20 %. В качестве примера на рисунке 4 приведены политермические разрезы для Fe-45% Si - Al и Fe - Si - 15% Al сплавов.

Из политермических разрезов следует, что кристаллизация **Fe-Si-Al** сплава, по составу эквивалентного ФС45 и содержащего 15 % Al, начинается с выделения из жидкого расплава двойной эвтектики, состоящей из кристаллов кремния и железокремниевого интерметаллида FeSi (49,0-50,5 % (ат.) Si). Затем при температуре ~ 550 °C из остатка жидкой фазы и кремния по перетектической реакции выделяется интерметаллид Al_xFe_y . При последующем охлаждении сплава при температурах порядка 230°C интерметаллид Al_xFe_y разлагается с выделением Al и образованием FeSi.

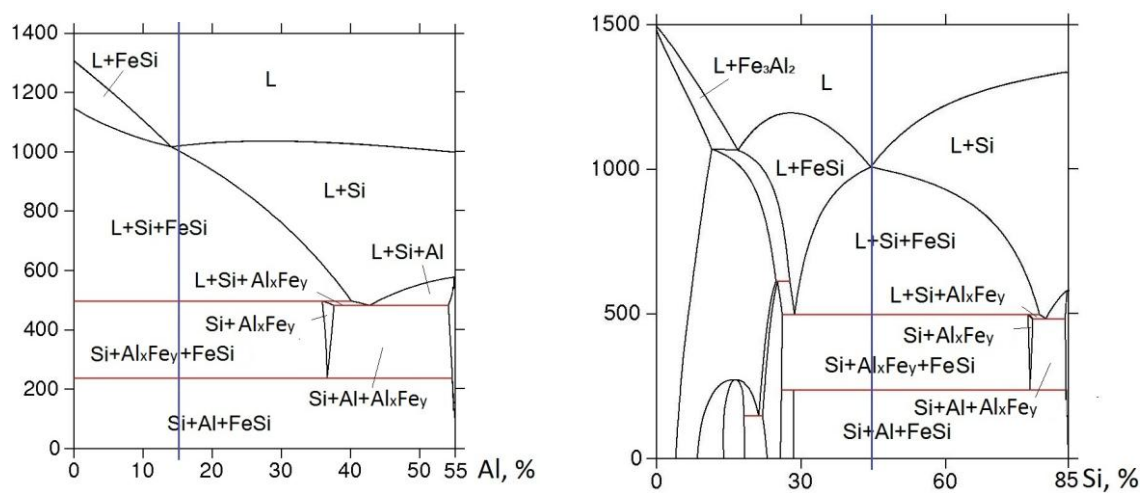


Рисунок 4 – Политермические разрезы фазовых диаграмм состояния систем Fe – (45% Si) – Al (а) и Fe – (15% Al) – Si (б)

В реальных условиях низкотемпературное превращение не реализуется, видимо, из-за заторможенности диффузионных процессов. Поэтому, как показал микрорентгеноспектральный анализ состава фаз ферросиликоалюминия, структура сплава состоит в основном из зерен кремния, интерметаллида железа (Al_xFe_y) и железокремниевой фазы (FeSi).

Как следует из политермических разрезов, ферросиликоалюминий ФС45А15 по составу является эвтектическим и околоэвтектическим с температурами плавления-затвердевания в пределах 1005-1018 °C. При введении ФСА в жидкую сталь фазовые превращения должны

протекать в направлении, обратном рассмотренному. Но ввиду быстротечности процесса внепечной обработки, разливки и затвердевания стали оно, возможно, не успевает реализоваться в полной мере. В частности, интерметаллидная фаза Al_xFe_y может некоторое время существовать в жидкой стали. Это вполне вероятно из-за невысокой температуры ковшовой обработки и разливки стали 110Г13Л (в интервале 1500 -1450 °С). И если наноразмерные частицы этой фазы «доживут» до начала кристаллизации стали, то они могут стать центрами зарождения аустенитных кристаллов и обеспечить измельчение литого зерна.

2.5 Сравнительная оценка эффективности замены алюминия на ферросиликоалюминий при ковшовой обработке стали

Объектами сравнения являлись стали, обработанные в ковше по экспериментальной технологии комплексом (ФСА + Ti) и по серийной технологии комплексом (Al + Ti). Эффективность вариантов ковшовой обработки оценивали по содержанию и активности кислорода, размеру литого аустенитного зерна, характеру излома образцов, составу и содержанию неметаллических включений, остаточному содержанию алюминия и титана и показателям механических свойств (прочности, пластичности и ударной вязкости).

Содержание кислорода определяли в образцах стали, отобранных в печи перед выпуском и в ковше. Параллельно в печи и в ковше определяли активность кислорода.

Общее содержание кислорода в стали перед выпуском из печи составляет 0,0035-0,0037 %, но при ковшовой обработке оно снижается до 0,0014 - 0,0021 %. При этом обработка стали в ковше по опытной технологии обеспечивает на треть меньшее содержание кислорода (таблица 4).

Таблица 4 – Содержание кислорода в стали 110Г13Л при различных вариантах плавки и ковшовой обработки

№ плавки	Вариант ковшовой обработки стали	Место отбора пробы	Содержание кислорода $\sum [O]$, % масс
459	Обработка в ковше комплексом (3,5 кг/т ФСА + 1,6 кг/т Ti)	Печь	0,00368
		Ковш	0,00137
508	Обработка в ковше комплексом (0,7 кг/т Al + 1,6 кг/т Ti)	Печь	0,00352
		Ковш	0,00207

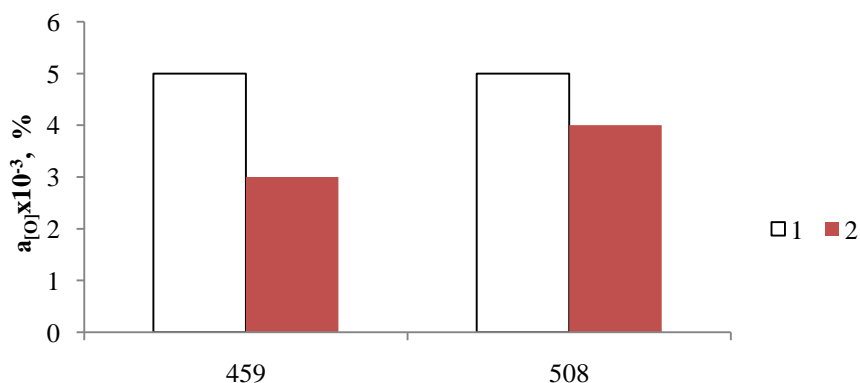


Рисунок 5 – Активность кислорода в жидкой стали в печи (1) и в ковше (2)

Измерение активности кислорода показывает (рисунок 5), что при одинаковой активности кислорода в стали перед выпуском из печи ковшовая обработка расплава комплексом (ФСА+Ti) обеспечивает более глубокое раскисление, чем в случае обработки её обработки комплексом (Al+Ti).

Микроструктура стали. Микроструктуру стали исследовали в литом и термообработанном состояниях на специально отлитых образцах. Термообработку (далее – ТО) образцов (закалку) осуществляли совместно с отливками путем нагрева отливок в камерной печи до температуры 1050–1120 °С, выдержки в зависимости от наибольшего сечения отливок от 3 до 5 часов и охлаждения в барботируемой воде с температурой не более 40 °С с перемещением садки по вертикали и горизонтали не менее 7 минут.

Оценка размера аустенитного зерна показала, что в образцах стали, обработанных в ковше по серийной технологии аустенитное зерно имеет балл 3-4, при этом карбидные выделения расположены по границам зерен в виде крупных колоний (рисунок 6, а). При обработке стали в ковше по опытной технологии образцы имеют аустенитное зерно с более высоким баллом (4-5), при этом карбиды расположены также по границам зерен, но в виде тонкой сетки (рисунок 6, б). При этом, в образцах стали, обработанных по серийному варианту, размер аустенитного зерна после ТО не изменился (рисунок 6, в). В то же время в образцах стали, полученных по опытному варианту (рисунок 6, г), размер аустенитного зерна изменился до 5-6 баллов, а границы зерен аустенита не имеют карбидной сетки.

Наиболее мелкое зерно, как в литом, так и в термообработанном состоянии получено после ковшовой обработки стали комплексом (0,35% ФС45А15 + 0,16% Ti). При этом измельчается ее дендритная структура и сокращается зона транскристаллизации в отливках. Структура стали приобретает плотное и однородное строение. Излом на образцах опытных плавок был матовым и мелкозернистым.

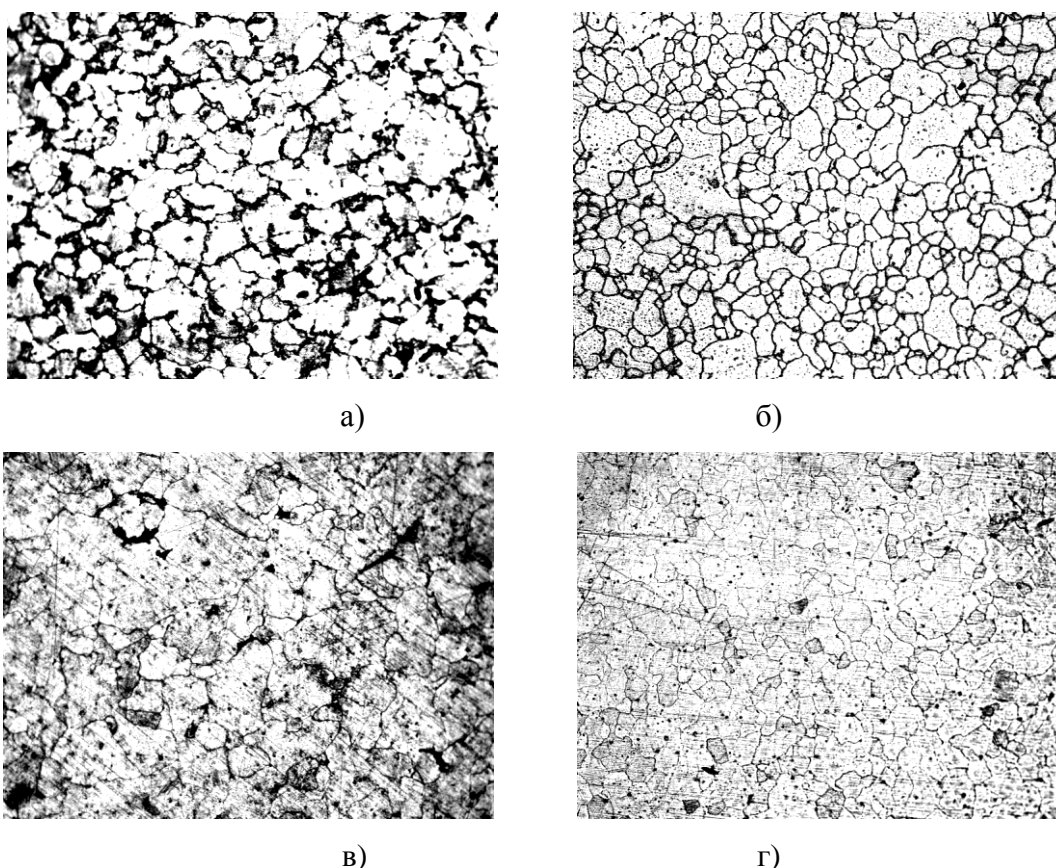


Рисунок 6 – Микроструктура литой (а и б) и закаленной (в и г) стали 110Г13Л, обработанной в ковше по серийной (а и в) и опытной технологии (б и г); $\times 100$.

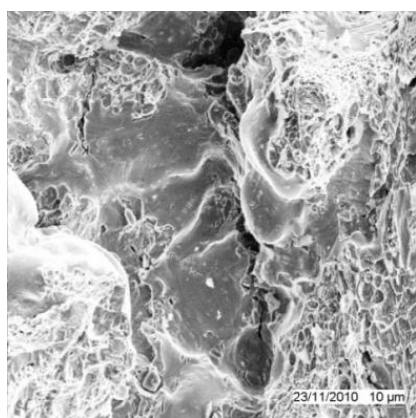
Строение изломов высокомарганцевой стали изучали на образцах после их испытания на ударную вязкость. Фрактографические исследования проводили на электронном микроскопе JSM-35CF фирмы Jeol.

Разрушение литой стали, обработанной комплексом $Al+Ti$, носит межзеренный характер. В изломе наблюдается большое количество вторичных трещин по границам зерен вглубь образца (перпендикулярно плоскости разрушения). На поверхности зерен, размер которых достигает 50 мкм, наблюдается большое количество разрушенных карбидов, которые образуют сплошной слой. В изломе наблюдаются поры кристаллизационного происхождения, поверхность которых повторяет дендритное строение аустенита. На поверхности дендритов в порах отчетливо видны колонии карбидов (эвтектики). Расстояние между пластинками карбидов сопоставимо с высотой ступенек, наблюдаемых на участках хрупкого разрушения по границам зерен.

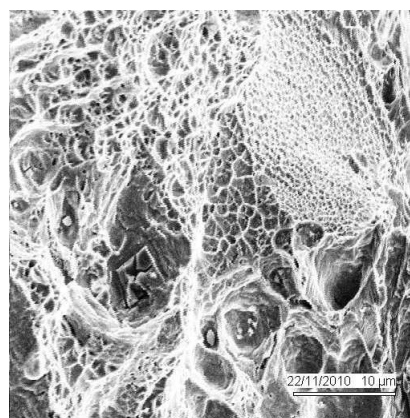
Характер разрушения литой стали, обработанной комплексом $ФСА+Ti$, аналогичен описанному выше. Однако, на поверхности излома, кроме разрушенных частиц карбида,

присутствуют включения в виде параллелепипедов, с размером стороны до 3 мкм. По-видимому, это частицы нитрида титана, выявленные при металлографических шлифах.

Излом закаленного на аустенит образца, обработанного Al+Ti, имеет общий характер разрушения вязкий, с большим количеством ямок и гребней (рисунок 7, а). Разрушение носит смешанный характер – есть участки как внутри-зеренного, так и меж-зеренного разрушения. На участках вязкого разрушения наблюдаются включения частиц разного типа и размеров, которые расположены на дне ямок. Эти частицы имеют вид кубов, характерный для включений нитрида титана, размером до 3 мкм, или компактных округлых включений диаметром до 1,5-3,0 мкм. Включения кубической формы чаще всего представлены в виде растрескавшихся или разрушенных частиц. Включения округлой формы не разрушены. Округлые включения встречаются также в виде крупных одиночных (изолированных) частиц, а мелкие ($\approx 0,5$ мкм) в виде скоплений корунда (Al_2O_3). Поскольку вокруг включений наблюдается вязкое разрушение, то это является свидетельством того, что они расположены внутри зерен. После термообработки на поверхности дендритов в порах уже не наблюдается эвтектических выделений карбидов, следовательно, при термической обработке произошло их полное растворение. Вследствие этого исчез хрупкий слой на поверхности зерен в местах разрушений, характерный для литых образцов. По этим признакам можно также судить о полноте проведенной термической обработки.



а



б

Рисунок – 7 Фрактограммы изломов образцов закаленной стали 110Г13Л, обработанных в ковше: а) - (Al + Ti) и б) - (ФСА + Ti)

Излом образцов, обработанных комплексом ФСА+Ti, после термообработки также имеет вязкий характер разрушения (рисунок 7, б). В изломе присутствует большое количество зон со значительной пластической деформацией и участки мелкоямочного разрушения. На поверхности дендритов в порах проступают скопления неметаллических включений –

предположительно Al_2O_3 . Видны также включения нитридов титана кубической формы, расположенные внутри глубоких ямок, размером до 3 мкм, и округлые одиночные частицы размером до 3,0 мкм, а также скопления округлых частиц размером менее $\approx 0,5$ мкм. В данном изломе включения кубической формы встречаются и группами, чего не наблюдалось в случае обработки стали комплексом $\text{Al}+\text{Ti}$. Преобладает внутризеренное разрушение. При этом в случае выхода плоскости разрушения на поверхность зерна видны неглубокие ямки, что свидетельствует о вязком характере разрушения и отсутствии на границе зерен хрупких неметаллических включений (пленочных AlN).

Отмеченные изменения в строении излома литой стали 110Г13Л свидетельствуют о том, что при ковшовой обработке комплексом $\text{ФС45Al5}+\text{Ti}$ взамен комплекса $\text{Al}+\text{Ti}$ в отливках формируется более плотная и дисперсная структура, с более чистыми границами зерен, поэтому у неё возрастают показатели механических свойств, прежде всего, способность сопротивляться хрупкому разрушению.

Оценка НВ. Для выявления основных типов включений в образцах стали, выплавленной по серийной и опытной технологиям, применяли металлографический и микрорентгеноспектральный методы анализа. Основными типами НВ в стали, обработанной комплексом $\text{Al}+\text{Ti}$ являются нитриды титана TiN – одиночные и в виде скоплений, оксиды алюминия Al_2O_3 (корунд), железо-марганцевые оксиды $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{O}$, мно-гофазные включения в виде частиц корунда, окаймленных железомарганцевым сульфидом, сульфиды марганца MnS , железо-марганцевые оксисульфиды $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{S} (\text{Fe}, \text{Mn})\text{O}$.

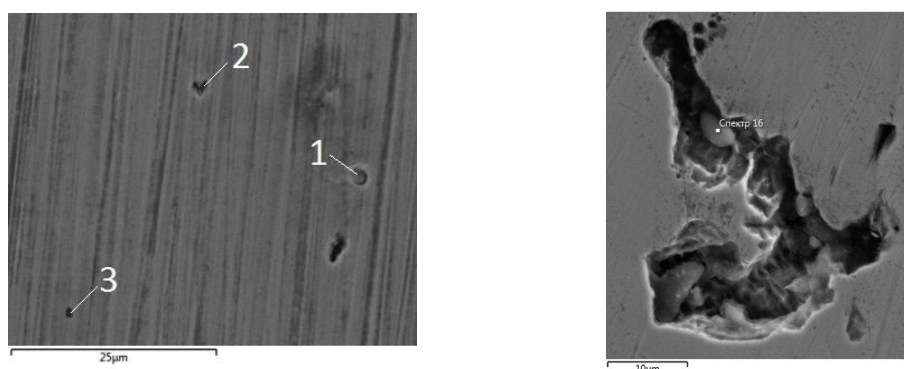


Рисунок 8 – Неметаллические включения в стали 110Г13Л, обработанной в ковше комплексом $\text{Al}+\text{Ti}$ (а) и $\text{ФСА}+\text{Ti}$ (б)

Фотографии всех типов выявленных включений приведены в диссертации, а в автореферате в качестве примера показаны типичные неметаллические включения в сталях, обработанных в ковше по серийной и опытной технологиям. В стали, обработанной комплексом

Al+Ti, неметаллические включения представляют собой – железомарганцевый оксисульфид 1 (Fe, Mn)S·(Fe, Mn)O, железомарганцевый сульфид 2 (Fe, Mn)S, оксид алюминия 3 Al_2O_3 в оболочке из железомарганцевого сульфида (Fe, Mn)S (рисунок 8 а). В стали, обработанной комплексом ФСА+Ti, на шлифе наблюдали значительное количество пор, при этом из включений удалось обнаружить лишь Al_2O_3 (рисунок 8 б), которое тоже располагалось в поре.

Остаточное содержание Al и Ti. Исследовали также остаточное содержание и степень усвоения алюминия и титана при серийном и опытном вариантах раскисления стали 110Г13Л.

При обработке стали по серийной технологии концентрация остаточного алюминия колебалась в пределах от 0,012 до 0,026 %. При этом среднее содержание остаточного алюминия составило 0,019 %, а степень усвоения - 19,7 %. При обработке стали по опытной технологии содержание остаточного алюминия колебалось в пределах 0,013-0,044 %. При этом среднее содержание остаточного алюминия составило 0,026 %, степень усвоения - 48,3 %.

На рисунке 10 приведены сравнительные частотные характеристики содержания остаточного алюминия при ковшовой обработке стали 110Г13Л по серийной и опытной технологиям.

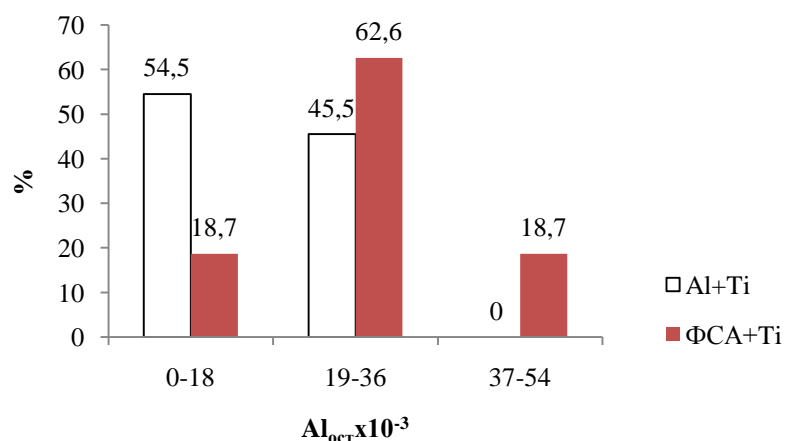


Рисунок 10 – Остаточное содержание алюминия стали, обработанной комплексами Al + Ti (1) или ФСА + Ti (2)

Анализ содержания титана в серийных и опытных плавках показал (рисунок 11), что в случае применения ФСА остаточное содержание титана составило 0,092 % по сравнению с 0,082 % при присадке титана совместно с алюминием, угар титана колебался в пределах 34-49 % и 39-58 % соответственно. Это свидетельствует о том, что при таком же расходе титановой губки степень усвоения титана возрастает с 53,7 % до 58,4 % в случае его введения совместно с ФСА.

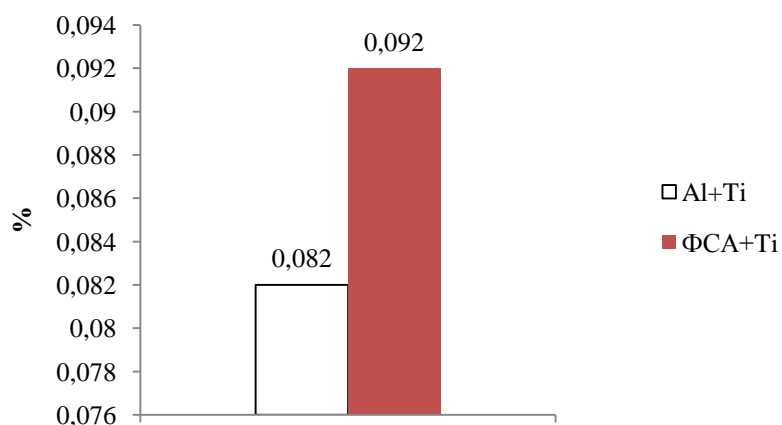


Рисунок 11 – Остаточное содержание титана в стали, обработанной комплексом Al + Ti и ФСА + Ti

Механические свойства стали. Улучшение структуры стали способствовало улучшению ее механических свойств. В таблице 5 приведены средние значения показателей механических свойств стали серийных и опытных плавок (статистическая обработка проведена по данным 20 серийных и 29 опытных плавок).

Таблица 5 – Механические свойства стали 110Г13Л, обработанной в ковше по серийной или опытной технологии

Вариант ковшовой обработки	Механические свойства		
	σ_B , МПа	δ_5 , %	KCU, МДж/м ²
Серийный	729,13 ± 60,09	23,50 ± 4,63	2,01 ± 0,36
Опытный	829,75 ± 52,68	36,35 ± 3,64	2,25 ± 0,45

Из таблицы 5 следует, что замена комплекса (Al+Ti) для ковшовой обработки стали на комплекс (ФСА+Ti) обеспечивает увеличение ударной вязкости KCU на ~ 12 %, увеличение временного сопротивления σ_B на ~ 14 %, увеличение относительного удлинения δ_5 на ~ 55 %. Отливки из стали, обработанной в ковше комплексом (ФСА+Ti), не имели критических несоответствий по горячим трещинам.

2.6 Опытнo-промышленное опробование и разработка технологических рекомендаций

По результатам выполненных исследований разработаны технологические рекомендации для получения качественных отливок из стали 110Г13Л, которые включают: а) измерение активности кислорода $a_{[O]}$ в расплаве; б) прогнозирование $\Sigma(\text{FeO}+\text{MnO})$ в шлаке на основе измерения активности кислорода в расплаве; в) ковшовую обработку стали комплексом ФСА + Ti.

Эффективность разработанных рекомендаций была проверена при опытнo-промышленном их опробовании на АО «Алюминий Казахстана» в условиях производства из высокомарганцевой стали 110Г13Л зубьев ковшей экскаваторов ЭКГ-4,6 и ЭКГ-8. Сталь плавилась в 5-т электродуговой печи с основной футеровкой методом переплава или сплавления. Качество диффузионного раскисления стали контролировали по активности кислорода в жидкой стали в печи. При этом пользовались номограммами (рисунок 12) для различных содержаний марганца, которые позволяют по величине измеренной активности кислорода при известном содержании марганца в расплаве прогнозировать значение $\Sigma(\text{FeO}+\text{MnO})$ в шлаке. Так, по номограмме для 11,5 % [Mn] условие $\Sigma(\text{FeO}+\text{MnO}) \leq 6,0$ % достигается при $a_{[O]} \leq 0,0006$ %. Из аналогичной другой номограммы для диаграммы 14,5 % [Mn], для гарантированного обеспечения того же условия достаточно иметь $a_{[O]} \leq 0,0005$ %.

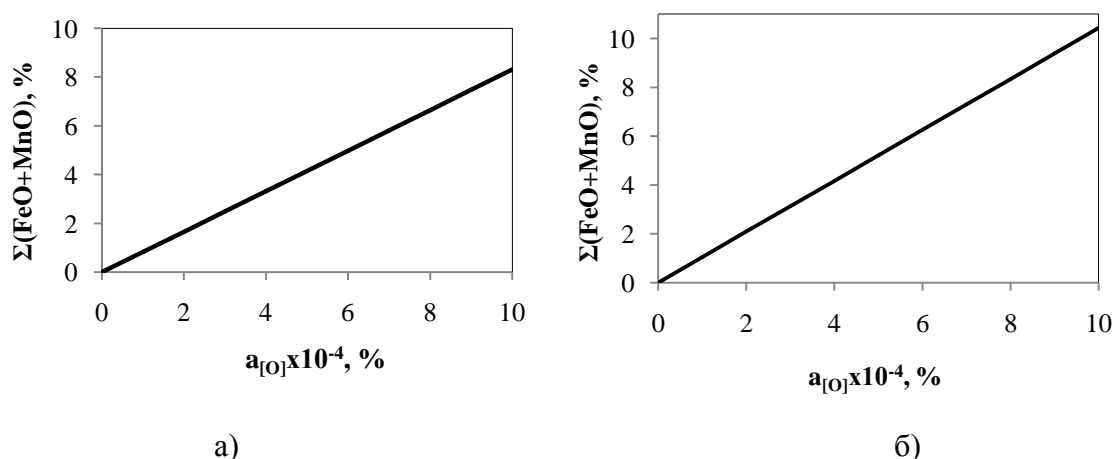


Рисунок 12 – Номограммы прогнозирования $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ в шлаке по активности кислорода $a_{[O]}$ в расплаве, при содержании [Mn]: а) 11,5 % и б) 14,5

Сталь в ковше обрабатывали комплексом (0,35% ФС45А15 + 0,16% Ti). Затем её разливали в формы из песчано-глинистой смеси. Для оценки механических свойств стали вместе с зубьями отливали бруски в соответствии с требованиями ГОСТ 977-88. Результаты испыта-

ний показали, что полученная сталь 110Г13Л имеет ударную вязкость КСЧ 2,63 МДж/м², что на 30% выше среднего показателя серийных плавов (2,01 МДж/м²). При этом временное сопротивление σ_b составило 954,2 МПа, а относительное удлинение δ_5 - 38 %.

Таким образом, результаты опытно-промышленного опробования подтверждают возможность прогнозирования с высокой надежностью содержания в шлаке $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ по активности кислорода в расплаве высокомарганцевой стали и эффективность применения ферросиликоалюминия ФС45А15 вместо алюминия АВ 91 при ковшовой обработке им совместно с титаном. Реализация разработанных технологических рекомендаций позволяет получать качественные отливки без дефектов, с высоким и стабильным уровнем механических свойств и повысить эффективность ковшовой обработки и получить за счет снижения расхода раскислителя и модификатора экономический эффект 102 руб/т (486 тенге/т) литья.

3. ВЫВОДЫ

1. Показано, что при производстве отливок из высокомарганцевых сталей содержание $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ в шлаке может быть с высокой надёжностью (коэффициент корреляции $R = 0,98$) спрогнозировано по активности кислорода и концентрации $[\text{Mn}]$ в жидкой стали по соотношению: $(\text{MnO}) + (\text{FeO}) = a_{[\text{O}]} \cdot (180,3 + 706,8 \cdot [\text{Mn}])$.

2. С использованием компьютерной программы Thermo-Calc построены политермические разрезы тройных систем Fe-Si-Al для области составов, соответствующих сплаву ФС45А15, по которым с учетом экспериментальных данных установлены последовательность, характер и температуры фазовых превращений, протекающих при кристаллизации и нагреве сплава.

3. Показано, что применение ферросиликоалюминия совместно с титаном при ковшовой обработке жидкой стали 110Г13Л эффективнее, чем применение вторичного алюминия с титаном, что подтверждается большим (в 1,5 раза) снижением содержания кислорода при раскислении, а также лучшим усвоением алюминия (в 2,5 раза) и титана (на 5 %).

4. Применение комплекса ФС45А15 (0,35 %) + Ti (0,16 %) для внепечной (ковшовой) обработки стали 110Г13Л взамен комплекса алюминия АВ91 (0,07 %) + Ti (0,16 %) обеспечивает повышение следующих показателей качества отливок: уменьшение размера зерна в литом состоянии на 1-2 балла и в термообработанном на 1-2 балла; увеличение ударной вязкости КСЧ на ~ 12 %; увеличение временного сопротивления σ_b на ~ 14 % и относительного удлинения δ_5 на ~ 55 %; устранение брака по трещинам.

5. Разработаны технологические рекомендации для получения качественных отливок из стали 110Г13Л, которые включают: а) измерение активности кислорода $a_{[\text{O}]}$ в расплаве;

б) прогнозирование $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ в шлаке на основе измерения активности кислорода в расплаве; в) ковшовую обработку стали комплексом $\text{FSA} + \text{Ti}$.

6. Проведено опытно-промышленное опробование разработанных технологических рекомендаций на АО «Алюминий Казахстана» при изготовлении зубьев ковшей экскаваторов ЭКГ-4,6 (5) и ЭКГ-8 (10) и показано, что применение их позволяет существенно упростить управление процессом проведения восстановительной плавки высокомарганцевых сталей, сделать более эффективным процесс внепечной обработки стали в ковше, устранить образование трещин и получать отливки с требуемой структурой и высокими показателями механических свойств.

7. Реализация разработанных рекомендаций по части замены чушкового алюминия на ферросиликоалюминий ФС45А15 позволяет получить экономический эффект в размере 278 тыс. тенге.

Основные результаты работы представлены в публикациях:

1. Тен Э.Б., Лихолобов Е.Ю. Повышение качества отливок из стали 110Г13Л обработкой в ковше ферросиликоалюминием и титаном // Литейщик России. – 2010, № 10. – С. 18-21.

2. Тен Э.Б., Лихолобов Е.Ю. Контроль окисленности жидкой стали 110Г13Л и оптимизация ее ковшевой обработки // Труды 4-й международной научно-практической конференции «Металлургия Прииртышья в реализации программы форсированного индустриально-инновационного развития «Казахстан-2030» Павлодар.: ПГУ им. С. Торайгырова. – 2011. – С.188-192.

3. Тен Э.Б., Лихолобов Е.Ю. Эффективность ковшевой обработки стали 110Г13Л ферросиликоалюминием и титаном // Материалы международной научно-практической конференции «Гетерогенные процессы в обогащении и металлургии» Караганда.: ХМИ им. Ж. Абишева. – 2011. – С.328-329.

4. Тен Э.Б., Лихолобов Е.Ю. Термодинамические предпосылки управления процессом плавки 110Г13Л измерением активности кислорода в расплаве // Труды международной научной конференции «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан-2030» Караганда.: КарГТУ. – 2011. – С.385-387 Материалы международной научно-практической конференции.

5. Тен Э.Б., Лихолобов Е.Ю. Прогнозирование содержания в шлаке $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$ при плавке стали 110Г13Л по активности кислорода в расплаве // Прогрессивные литейные технологии. Труды VI международной научно-практической конференции М.: МИСиС. – 2011. – С.153-155.

6. Тен Э.Б., Базлова Т.А., Лихолобов Е.Ю. Влияние ковшевой обработки на строение излома стали 110Г13Л в литом и закаленном состояниях // Прогрессивные литейные технологии. Труды VI международной научно-практической конференции М.: МИСиС. – 2011. – С.155-157.

7. Тен Э.Б., Лихолобов Е.Ю. Совершенствование технологии выплавки стали 110Г13Л путем контроля окисленности ее расплава // Литейщик России. – 2011, № 12. – С. 12-14.

8. Тен Э.Б., Лихолобов Е.Ю. Управление процессом плавки стали 110Г13Л измерением активности кислорода в расплаве //Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2012, № 1. – С. 45-48.

