Левченко, Александр Всеволодович. Математическое моделирование формирования неметаллической фазы и ее роли в образовании физической неоднородности литого металла : диссертация ... кандидата технических наук : 05.16.02.- Москва, 2000.- 161 с.: ил. РГБ ОД, 61 00-5/1229-5

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ И СПЛАВОВ (ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

ЛЕВЧЕНКО АЛЕКСАНДР ВСЕВОЛОДОВИЧ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФАЗЫ И ЕЕ РОЛИ В ОБРАЗОВАНИИ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЛИТОГО МЕТАЛЛА

Специальность 05.16.02 - Металлургия черных металлов

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Доцент, K.T.H. ПАНКРАТОВ *О С.* Научный консультант: Профессор, д.т.н. ГОРОХОВ Л.С.

Москва - 2000

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ВВЕДЕНИЕ 4

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР) 8
   1. Экспериментальные работы 8
      1. Классификация неметаллических включений 8
      2. Условия образования неметаллических включений

в сплавах на основе железа 12

* 1. Теоретическое исследование образования включений методом моделирования 28

1. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ СЛИТКА 36

* 1. Теория квазиравновесной двухфазной зоны для бинарного сплава 36
  2. Распространение теории квазиравновесной двухфазной зоны на многокомпонентный расплав 44
  3. Оценка влияния конвективных потоков на перенос примеси 48
  4. Возможность разделения замкнутой задачи теории квазиравновесной двухфазной зоны на тепловую и диффузионную задачи 52
  5. Термодинамические условия образования неметалличес­ких включений 58

1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ОБРАЗОВАНИЯ

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ 69

* 1. Приложение теории квазиравновесной двухфазной зоны к

расчету химической неоднородности тепловой и

концентрационной многокомпонентной задачи 69

* + 1. Объекты расчета 69
    2. Концентрационная неоднородность

многокомпонентного сплава на основе железа 75

* 1. Методика увеличения - «Zoom» для детализации картины температурно-концентрационной неоднородности 98
  2. Особенности ликвационного накопления сульфидной фазы

в сталях с различным исходным содержанием серы 103

1. Выбор точек расчета и результаты 106
2. Влияние соотношения сульфидов железа и марганца на склонность сплава к образованию комплексных сульфидов 107
3. ВЛИЯНИЕ СУЛЬФИДОВ НА ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ

ТРЕЩИН В СТАЛИ 116

* 1. Условия образования трещин, инициируемых жесткими сульфидными включениями в металле 116
  2. Развитие трещин,инициируемых жесткими включениями в затвердевающем метахле 132

[ВЫВОДЫ 149](#bookmark37)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 152

ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Развитие различных отраслей промышленности, науки и техники требует решения проблемы повышения качества стали. Современные конструкции и их элементы часто находятся в сложных условиях эксплуатации, характеризуемые широким интервалом температурно­динамических воздействий. В связи с этим очевидна необходимость проведения дальнейших изучений различных свойств стали с целью коренного улучшения ее производственных характеристик.

Качество стали во многом зависит от химического состава, технологии производства и обработки продукции. В ее состав попадают не только целенаправленно вводимые компоненты, но и элементы - нежелательные примеси, ухудшающие структуру и свойства. Поэтому регулирование состава, формы, количества и распределение включений является важным резервом улучшения ее свойств. Для большинства сталей наиболее вредной и трудно устранимой примесью является сера, отрицательно влияющая, прежде всего, на пластичность и ударную вязкость. Практически во всех сталях, содержащих хотя бы более 0.015% *S,* на долю сульфидных и оксисульфидных включений приходится более 70-80% от всех неметаллических включений и их влияние заметно сильнее, чем оксидов, что в значительной степени определяет направление работы по изучению включений.

Анализ имеющихся результатов не дает однозначного ответа на вопросы о происхождении и условиях образования неметаллических включений. Поэтому, наиболее важным является создание и разработка математических расчетов на основе экспериментальных данных, преследующих цель прогнозирования и объяснения опытных результатов. При промышленном производстве стали появление включений, влияющих на конечные свойства продукции, может свести на нет усилия, затраченные на разработку состава и технологию ее производства. В связи с этим, прогноз и, возможно, управление на основе математического моделирования процессами формирования и

распределения включений позволит получать продукцию со свойствами, близкими к заданным.

**Цель работы.** Исследование и прогнозирование процессов образования, развития, распределения сульфидных включений, а так же изучение возможности их дальнейшего влияния на зарождение и распространение внутренних трещин в стальном слитке.

**Задачи исследования.**

1. Проведение теоретического анализа условий образования сульфидных включений при охлаждении и кристаллизации стали.
2. Исследование возможности образования и развития внутренних трещин, инициированных сульфидными включениями.
3. Определение методом вычислительного эксперимента:

условий и результатов процесса образования докристаллизационных неметаллических включений при температурах жидкой стати; условий и результатов процесса образования неметаллических включений при кристаллизации стали с учетом химических реакций, температурных и концентрационных факторов, влияющих на кинетику реакций в двухфазной зоне;

связи между концентрацией примеси и ее распределением по объему слитка;

условий распространения внутренних трещин, главную роль в зарождении которых играют неметаллические включения.

1. Проверка расчетных результатов методом сравнения с экспериментальными данными для адаптации математической модели.
2. Анализ результатов и прогноз состава и распределения неметаллических включений в стали.

**Научная новизна.** Состоит в том, что:

1. обоснована возможность разделения замкнутой задачи теории квазиравяовесной двухфазной зоны на тепловую и диффузионную задачи;
2. получены данные последовательного решения тепловой и диффузионной задач, позволяющие связать результаты расчетов термодинамики образования сульфидных включений с координатами сечения слитка;
3. разработан программный модуль, позволяющий с помощью линейной апроксимации детализировать картину и последовательно определять параметры двухфазной зоны и термодинамические характеристики образования сульфидных включений в объемах, соизмеримых с размером включения;
4. применение модели к анатизу диффузионного накопления серы и образования сульфидов в сталях с низким содержанием серы дало основание для заключения о возможности снижения технологического содержания марганца в чистых сталях;
5. разработана методика расчета на основе систем интегральных сингулярных уравнений возможного появления внутренних трещин, источником которых являются сульфидные включения;
6. разработана методика приближенного расчета развития внутренних трещин при совместном решении уравнений упругости и пластичности.

**Достоверность полученных выводов.** Обусловлена использованием современных методов и средств математического моделирования, основанных на фундаментальных уравнениях сохранения массы и переноса вещества, а также удовлетворительным согласованием расчетных результатов с экспериментальными данными.

**Практическая значимость работы.** Полученные в работе результаты расчетов дают возможность более глубоко понимать происхождение различных по составу неметаллических включений,их природу и процесс образования.

Разработанный комплекс моделей позволяют проводить количественную оценку образования различных сульфидных включений в зависимости от начального содержания серы и марганца. Результаты прогнозирования возможно найдут применение при разработке технологии рафинирования

различных составов стали. Например, изменение температуры сульфидообразования, характеризуемое выделением определенных типов сульфидных включений, необходимо регулировать добавками различных компонентов, влияющих на температуру (*Са, Zr, Се).*

Созданная структура моделей может быть использована, кроме того, для исследования трещин различной природы при кристаллизации разных марок статей.

Полученные автором, как количественные оценки, так и отдельные модели, могут быть также использованы для решения широкого круга задач металлургии, металловедения и т.д.

**Апробация работы и публикации.** По результатам исследования опубликовано 3 статьи.

Материалы диссертации доложены в ЗАО НПЦ «ВНИПИ САУ-30», ФГУП ЦНИИЧермет им. Бардина.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка.

Полный объем работы 160 страниц, в том числе 46 рисунков, 12 таблиц. Текст изложен на 114 страницах. Список литературы насчитывает 133 наименования.

выводы

1. Обзор имеющихся исследований влияния включений на качество продукции свидетельствует об актуальности проблемы поиска методов расчета и регулирования содержания сульфидных включений в стали. В большинстве работ посвященных прогнозированию образования сульфидных включений этот вопрос решается положительно, однако, их решение практически не связано с учетом пространственного распределения включений в объеме затвердевания, что во многом влияет на физко-механические свойства стали. Сочетание полученных данных математического анализа с экспериментальными результатами других исследований является наиболее рациональным методом решения данной проблемы.
2. Для описания условий формирования неметаллической фазы используется понятие пересыщения - превышения расчетного произведения активности над «равновесным». Разработана математическая модель образования сульфидных включений при кристаллизации многокомпонентного расплава и выполнена ее численная реализация. Применение математического аппарата и численное решение на ЭВМ позволяет существенно расширить пределы исследования в отношении влияния температурных и концентрационных факторов на формирование включений.
3. Определена необходимость учета диффузионной составляющей в уравнении массопереноса примеси. Диффузионные процессы в жидкой части двухфазной зоны обусловлены гидродинамическими потоками жидкости, особенно в начале, когда доля твердой фазы составляет менее 5 %. Протекание данных процессов сопровождается обогащением жидкого ядра слитка различными примесями.
4. Установлена возможность раздельной реализации двух систем уравнений: теплового уравнения затвердевания бинарного сплава и концентрационного уравнения многокомпонентного сплава с разными предпосылками по компоненту, описывающему диффузионный массоперенос.
5. По результатам решения концентрационной задачи, рассмотренной для многокомпонентной системы *Fe-Mn-S-Si-O* на основе сталей, содержащих *Мп* (0.3 - 1.5%), *Si* (0.2 - 0.6%), *S* (0.001 - 0.025%) получено, что в условиях охлаждения жидкой стали до температуры ликвидус предкристалпизационные включения состоят на 95.6% из *Si02.*
6. Понижение температуры в границах двухфазной зоны позволили сделать следующие выводы:

* Начальная температура образования сульфидов для исследуемых расплавов находится в пределах от 1461 до 1498 °С, в зависимости от [5] и [Ми];
* Повышение содержания кремния увеличивает количество кислорода расходуемого на образование оксида *Si02;*
* В процессе кристаллизации сплавов содержание возникающих сульфидов практически не зависит от окисленности стали. При одинаковой окисленности стали количество серы расходуемое на протекание реакций зависит от начальной концентрации марганца;

1. Определена область преимущественного сульфидообразования по мере продвижения двухфазной зоны к оси слитка. Интенсивность изменения найденной зоны сопоставима с темпом роста объемной доли сульфидных включений при распределении их по сечению слитка, в направлении от поверхности к центру.
2. При использовании методики «Zoom», основанной на детализации картины вплоть до размеров, соизмеримых с размером включений, решена задача определения ликвационного накопления серы для слитков спокойной стали различных сечений. Полученные данные позволили снизить необходимое количество добавляемого марганца для сталей с содержанием серы менее
3. 01% без ухудшения технологических свойств.
4. Разработана математическая модель возможного образования трещин, инициируемых сульфидными включениями. На основании полученных результатов можно заключить следующее:

* Повышение коэффициента теплоотдачи уменьшает размеры включений (*Fe,Mri)S* и снижает интенсивности окружающих напряжений, что приводит к уменьшению образования трещин в стали;
* Понижение температуры увеличивает пределы прочности сгв малоуглеродистых сталей;
* Влияние коэффициента Пуассона на коэффициенты интенсивности напряжений мало заметно для трещин и более заметно для включений.

1. Результаты, полученные при реализации данной задачи, позволяют определить места вероятного образования внутренних трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпис Х.И. Поведение неметаллических включений в стали при кристаллизации и деформации. М.: Металлургия, 1971, с. 126.
2. Явойский В.И. Включения и газы в сталях. М.: Металлургия, 1979, с. 272.
3. Кислинг Р., Ланге Н. Неметаллические включения в стали. М.: Металлургия, 1968, с. 121.
4. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. М.: Металлургия, 1973, с. 310.
5. Малиночка Я.Н., Ковальчук Г.З. Сульфиды в сталях и чугунах. М.: Металлургия, 1988, с. 247.
6. Шульте Ю.А. Неметаллические включения в электростали. М.: Металлургия, 1964, с. 205.
7. Шульте Ю.А., Титаренко В.А., Шаломеев А.А. - ФХММ, 1973, № 2, с. 19- 22**.**
8. Крещановский Н.С., Трекало А.С. -В кн.: Труды Московского энергетического института. М.: Госэнергоиздат, 1972, с. 90 - 95.
9. Шульте Ю.А., Руденко В.П., Шаломеев А.А. и др. - ФХММ, 1967, т. 3, № 4, с. 424-427.
10. Kinoshita Т., Tokahashi Н., Nakayama М. J. Jap. Foundrymen’s Soc., 1973, 45, № 8, p. 649 - 657.
11. Малиночка Я.Н. Изменение сульфидов и свойства стали при высоком нагревании. Сталь и неметаллические включения. //Тем. сб. научн. тр. ЦНИИчермет, М.: Металлургия, 1980. с. 66-78.