**Кривоносова Екатерина Александровна. Модифицирование и формирование структуры металла сварных швов низкоуглеродистых сталей : диссертация ... доктора технических наук : 05.03.06.- Пермь, 2005.- 266 с.: ил. РГБ ОД, 71 05-5/714**

**ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**На правах рукописи**

КРИВОНОСОВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

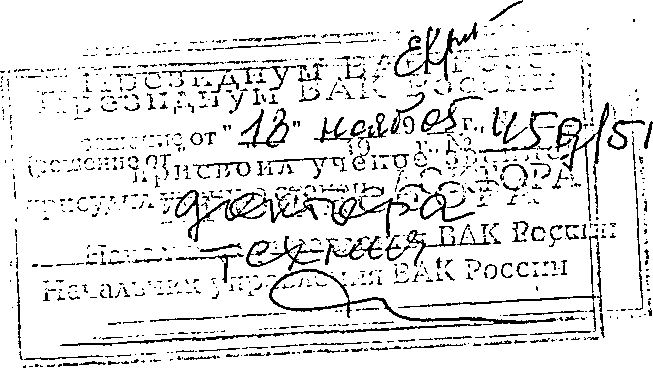
**МОДИФИЦИРОВАНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

05.03.06 - Технология и машины сварочного производства

**ДИССЕРТАЦИЯ**

Пермь - 2005

на соискание ученой степени доктора технических наук



**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Введение 5

Глава 1 Термодинамическая модель условий выделения моди- 14 фицирующих частиц в металле сварного шва

1. Применение концепции рациональных температур вы- 18 деления фаз для условий кристаллизации сварных швов

**I\***

*Y 2* Термодинамическая оценка условий выделения карбо- jg нитридных фаз титана в сварных швах низкоуглероди­стой стали при микролегировании титаном через элек­тродное покрытие

Глава 2 Кинетическая модель фазообразования модифици- 34 рующих частиц в металле сварного шва

1. Математическая модель кинетики роста частиц нитри- 35 да титана в сварном шве в твердом состоянии

**(I**

1. Оценка эффективного размера частиц нитрида титана в 42 сварном шве

Глава 3 Фрактальный подход к анализу структурообразования 52 металлов при сварке

1. *1* Геометрические и естественные фракталы 55

***m***

1. 2 Структура металла, как объект фрактального анализа ^g

3 3 Фрактальные мартенситные и дендритные структуры

3 4 Выбор меры для фрактального анализа структур метал- ^6 ла сварных швов

3 5 Фрактальный анализ Видманштеттовой структуры в 74 сварных швах

*№*

Глвав4 Неметаллические включения в металле сварных швов 99

Глава 5 Экспресс-методики оценки механических свойств ме- 120 талла сварного шва и технологических свойств элек­трода

1. Определение механических свойств металлов по твер- 120 дости

З

5.2. Методика экспресс-оценки критической температуры хрупкости по твердости

1. Низкотемпературная зависимость твердости ме­талла сварных швов
2. Стандартное определение критической темпера­туры хрупкости
3. Взаимосвязь температурного коэффициента твердости Р и критической температуры хрупкости Ткр
4. Точность метода экспресс-оценки хладостойко- сти

5 3 Методика оценки стабильности горения сварочной ду­ги

1. Анализ влияния состава покрытия электродов на стабильность горения дуги

Глава 6 Структурные факторы хладостойкости металла свар­ных швов. Оптимизация состава электродного покры­тия

1. Электроды с ферротитаном и каолином
2. Электроды с карбидной композицией
3. Электроды с уральским силикомарганцем и ферротита­ном

Глава 7 Некоторые аспекты усталостного разрушения металла сварных швов

1. Анализ критериев оценки усталостных свойств металла сварных швов
2. Методика малообразцовых испытаний на усталостный изгиб металла сварных швов
3. Анализ кинетических диаграмм усталостного разруше­ния металла сварных швов
4. Определение порогового значения коэффициента ин­тенсивности напряжений

Метод микротвердости для оценки размеров зоны по­вышенной пластической деформации при усталостном разрушении металла сварного шва

Фрактальный анализ поверхности усталостного разру­шения

Общие выводы по работе Заключение Список литературы Приложение 1 Приложение 2 Приложение 3

**ВВЕДЕНИЕ**

Сварные швы представляют собой многокомпонентные сплавы, свойства которых во многом определяются фазовым и структурным со­стоянием, сформировавшимся в них на этапе получения исходного мате­риала и на стадии образования сварного соединения. Поэтому управление структурным состоянием является важным элементом в общей стратегии разработки новых сварочных материалов и получения качественных свар­ных соединений. Основная проблема структурообразования при ручной дуговой сварке низкоуглеродистых сталей заключается в формировании неблагоприятной структуры металла шва, которая и определяет низкие значения хладостойкости и усталостных характеристик. Объектом иссле­дования является сталь Ст.З, широкое распространение которой экономи­чески обосновано на данном уровне прочности. Сталь относится к ферри- то-перлитному классу, структура металла шва таких сталей в условиях сварки характеризуется нестабильностью. Модифицирование металла шва таких сталей является наиболее эффективным для повышения его характе­ристик. Однако, существующие подходы к решению этой проблемы, осно­ванные на улучшении структуры металла шва путем модифицирования при легировании компонентами электродного покрытия, продолжают, в значительной мере, базироваться на эмпирических методах поиска путей обеспечения оптимальных свойств. Нет научного обоснования возможно­стей и результата модифицирования металла шва, формирующегося в ус­ловиях температурного цикла сварки.

В работе решается проблема управления структурообразованием металла шва при модифицировании с позиций термодинамического и ки­нетического моделирования процесса, фрактального подхода к описанию структуры металла шва и адекватных методик оценки его свойств.

Хотя эта задача давно привлекает внимание исследователей металлургов и сварщиков (Курдюмов Г.В., Кристиан Дж, Походня И.К., Фролов В.В.), до сих пор нет исчерпывающего понимания ме­ханизмов и факторов, контролирующих образование микроструктур при фазовых превращениях, особенно, в условиях сварки.

Традиционные представления, базирующиеся на принципах равновесной термодинамики, могут предсказать объемную долю фа­зы, выделяющейся при достаточно длительных временах изотерми­ческой выдержки, не характерных для сварки. Кроме того, эти пред­ставления не позволяют ответить на вопросы о размерах выделений и причинах появления той или иной морфологии выделяющихся фаз. Определяющую роль в проблеме формирования структурного со­стояния играют кинетические факторы, зависимость от траектории охлаждения, которые даже в более простом случае, не для условий сварки, являются наиболее сложной частью проблемы.

Сложность обозначенных проблем применительно к условиям сварки покрытыми электродами усугубляется тем, что, кроме темпе­ратурных и временных параметров технологического режима, зна­чительное влияние на структурообразование швов оказывает состав электродного покрытия, компоненты которого участвуют в процес­сах легирования, модифицирования и фазообразования металла шва.

Благодаря большому разнообразию составов и широким воз­можностям управления структурным состоянием и свойствами шва, покрытые электроды для ручной дуговой сварки занимают особое место среди сварочных материалов. По объему применения они ли­дируют в различных отраслях промышленности, причем уровень их потребления на протяжении последних десятилетий не снижается. По результатам статистических исследований Российского рынка, проведенных Концерном «ESAB», а также исследований Нацио­нального аттестационного комитета по сварке (НАКС), представ­ленных на рис.1 и 2, на покрытые электроды, совместно со свароч­ными проволоками, стабильно с конца 70-х г.г. приходилось более 85% объема применения сварочных материалов.Для предприятий Западно-Уральского региона, подконтрольных Госгортехнадзору, этот показатель еще выше - 87%.

Одним из важнейших требований, которым должны удовлетво­рять электроды, является обеспечение высокого уровня свойств ме­талла сварного шва. Существенное влияние на уровень общих и специальных свойств металла шва оказывают структурные факторы: состав, гомогенность и характер взаимного расположения фаз, мор­фология неметаллических включений. Структурные факторы в большинстве случаев, становятся определяющими в достижении вы­соких показателей таких свойств как пластичность, хладостойкость, трещиностойкость, усталостная прочности и др. При управлении структурообразованием сварных швов исключительно перспектив­ным является модифицирование структуры при легировании металла шва компонентами электродного покрытия. Возможности и особен­ности модифицирования структуры сварных швов исследованы не­достаточно: хотя существует общая теория модифицирования

(Гольдштейн М.И., Попов В.В., Ершов Г.С., Бычков Ю.Б., Гольд­штейн Я.Е., Стомахин А.Я., Турчанин А.Г.), исследований особен­ностей этого процесса для условий сварки низкоуглеродистых ста­лей нет. Существует необходимость оценки термодинамической ве­роятности образования модифицирующих фаз в сварном шве, а так­же кинетики их развития в условиях температурного цикла сварки.

Методологической основой исследований становятся,



Рис. 1. Соотношение объема использования различных сварочных материалов с 1975 по 2003 г



Рис. 2. Объемы применения различных способов свар­ки на предприятиях Уральского региона, подконтроль­ных ГГТН РФ:

РД - ручная дуговая сварка покрытыми электродами; РАД - ручная аргонно-дуговая сварка;

МП - механизированная сварка в среде углекислого га­за;

Г - газовая сварка;

Пр - прочие методы сварки.

с одной стороны, огромная экспериментальная база данных по протеканию различных металлургических процессов, сформирован­ная в традиционной металлургии (Куликов И.С., Григорян В.А., С.И.Попель, Турчанин А.Г.), с другой стороны, математические мо­дели, описывающие металлургические процессы при сварке на ос­нове фундаментальных законов химической термодинамики и кине­тики, тепло- и массопереноса (Бороненков В.Н., Королев Н.В., Ша­лимов М.П.) .

Управление структурообразованием сварных швов связано с необхо­димостью корректного описания структуры. Сложность структуры реаль­ных сварных швов является основным препятствием при выборе адекват­ных моделей для компьютерного конструирования структуры и прогнози­рования их свойств. Для этих материалов основными методами изучения структуры остаются пока оптическая, электронная микроскопия, а также рентгенографические и спектрометрические методы. Однако полученные при этом данные полностью не используются в моделировании и компью­терном конструировании структуры, поскольку они либо качественно представляют структуру, либо характеризуют ее отдельные фрагменты. Например, при анализе структур швов определенная трудность заключа­ется в корректной оценке параметров Видманштеттовой структуры, к ко­торой не всегда можно применить критерий "балл" зерна.

Значительный интерес в этом направлении представляет теория фракталов, разработанная в ее классическом варианте Г.Хакеном, Б.Мандельбротом, а также фрактальный анализ - математический алго­ритм выявления единого численного параметра - фрактальной размерно­сти - для описания многоуровневых структур, какими являются, в частно­сти, структуры металлов, поверхности изломов, пористые структуры, зоны разрушения, структурные границы вязко-хрупкого перехода и.т.п. (

Е.Федер, P.M. Кроновер, В.С.Иванова, И.Ж. Бунин, А.А.Оксогоев, Вос- тровский Г.В.). Таким образом, актуальной является задача использования нового для металловедения сварки фрактального подхода к анализу струк- турообразования швов, разработки алгоритма определения фрактальной размерности, как количественного показателя степени неоднородности и фрагментарности структур сварных швов. Практическое значение метода заключается в выявлении связи фрактальной размерности с уровнем свойств металла шва, а также введение фрактальных размерностей, наряду с критериями хладостойкости и чистоты шва, в задачи моделирования структурообразования и оптимизации состава электродного покрытия.

Не менее важным аспектом управления структурообразованием шва при модифицировании мелкодисперсными частицам карбонитридных фаз, является проблема прогнозирования влияния неметаллических включений на характер термодеформационных процессов при охлаждении сварного шва, связанных с различием физических констант неметаллического вклю­чения и металлической матрицы. Разупрочняющее действие неметалличе­ских включений представляет серьезную опасность, поскольку концентра­ция напряжений может превышать предельные для материала значения и включение, таким образом, может явиться очагом разрушения (Г.И.Бельченко,С.И.Губенко, Кислинг Р., Ланге Н.). Актуальным также яв­ляется вопрос о критическом размере включения, когда оно становится ре­альным концентратором напряжений, способным привести к появлению недопустимых при сварке дефектов - трещин.

Конечная цель изучения особенностей и управления структурообразо­ванием заключается в достижении нужного уровня свойств металла свар­ного шва. Особое внимание было обращено на наименее изученные крите­риальные свойства металла сварных швов, такие как критическая темпера­тура хрупкости, характеризующая хладостойкость, и пороговый коэффи­циент интенсивности напряжений при страгивании трещины, характери­зующий поведение металла в условиях циклического нагружения.

Систематические исследования пластичности металла сварных швов показали необходимость создания экспресс-методик, сочетающих в себе высокий уровень точности с возможностью сокращения трудоемкости эта­па подготовки образцов. Это в особенности актуально на этапе лаборатор­ной разработки состава электродного покрытия, когда их количество мо­жет достигать сотен вариантов.

В связи с этим достаточно перспективным является метод твердости, который давно и успешно используется для определения ряда механиче­ских характеристик металлов как наиболее простой, не требующий вырез­ки образцов и в то же время, достаточно точный метод (Я.Б.Фридман,

Н.Н.Давиденков, М.П.Марковец, В.М. Матюнин, А.А.Бочвар,

В.П.Шишокина, Георгиев М.Н., Григорович В.К.). Актуальной является задача опробования метода инденторных испытаний для определения кри­тической температуры хрупкости и создание экспресс-методики оценки хладостойкости по термическому коэффициенту твердости металла шва.

Сварные шва, с позиций общей теории усталости металлов и линей­ной механики разрушения, являются одними из наиболее сложных объек­тов. При их испытании возникает ряд проблем, связанных с неоднородно­стью свойств материала, сложностью структуры, наличием конструктив­ных и технологических концентраторов напряжений, остаточных напря­жений и т.д (А.С. Куркин , Э.Л. Макаров). Банк данных об усталостных свойствах металла и характеристиках развития трещины в условиях цик­лического нагружения для сварных соединений ограничен. Все имеющие­ся данные о поведении металла сварных швов в условиях знакопеременной нагрузки получены, в основном, на сплошных, однородных образцах. Серьезным препятствием для применения методик оценки ресурса конст­рукции является отсутствие необходимых данных о свойствах материала, в частности о параметрах кинетической диаграммы усталостного разруше­ния. Этап экспериментального определения критериальных свойств мате­риала, таких как показатель трещиностойкости - пороговый коэффициент интенсивности напряжений при страгивании усталостной трещины Kth, наименее разработан. Данные по критериальным свойствам (Kth) главным образом относятся к основному металлу и практически отсутствуют для металла шва и зоны термовлияния. Наряду с накоплением банка таких данных целесообразно развивать альтернативные методы их определения (Браун У., Сроули Дж., Коцаньда С., Вассерман Н.Н., Симонов Ю.Н.), а также принципиально новые способы их использования для создания вы­сококачественных сварочных материалов.

Результаты анализа существующих методов изучения и управления структурообразованием позволяют заключить, что существуют значитель­ные пробелы как в вопросах теоретического обоснования возможностей модифицирования структур металлов при сварке, так и в области разра­ботки адекватных методик оценки свойств металла шва. В этих условиях разработка модельных представлений о процессах формирования и моди­фицирования структуры в многокомпонентных сварных швах на базе тер­модинамического, кинетического подхода и теории фракталов в сочетании с адекватными методиками оценки критериальных свойств сварных швов является целесообразной и эффективной в решении фундаментальной про­блемы управления структурообразованием сварных швов и создания сва­рочных материалов с гарантируемыми свойствами.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Работа посвящена актуальной проблеме разработки основных прин­ципов формирования и модифицирования структуры сварных швов в мно­гокомпонентных сварных швах на базе термодинамического, кинетическо­го подхода и теории фракталов для управления процессом структурообра- зования металлов при сварке и создания сварочных материалов с повы­шенным уровнем свойств.

Цель работы: Научное обоснование закономерностей процессов модифицирования и формирования структуры металла сварных швов при легировании через электродное покрытие на основе термодинамического, кинетического моделирования и теории фракталов для создания свароч­ных материалов с повышенным уровнем свойств.

Задачи работы:

1. Установить термодинамические условия выделения модифицирующих фаз в металле сварных швов. Адаптировать концепцию рациональной тем­пературы выделения модифицирующих фаз для условий сварки.
2. Разработать кинетическую модель роста модифицирующих фаз в метал­ле шва с учетом температурных и временных особенностей сварки. На ос­нове модельных результатов установить эффективный размер модифици­рующих включений.
3. Разработать алгоритм фрактального анализа структурообразования ме­таллов при сварке. Определить фрактальную размерность - количествен­ный показатель степени однородности и фрагментарности структур свар­ных швов.
4. Изучить разупрочняющее действие неметаллических включений в про­цессе охлаждения и деформирования металлической матрицы.
5. Разработать методики экспресс-оценки механических свойств металла сварного шва и технологических свойств электродов.
6. Установить закономерности влияния состава электродного покрытия на формирование структуры, показатели хладостойкости и характеристики усталости металла сварного шва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен комплексный подход к решению проблемы создания электродных покрытий, обеспечивающих гарантируемый уровень свойств металла сварного шва низкоуглеродистых сталей, основанный на термодинамическом моделировании возможности образования модифицирующих фаз в металле шва, кинетических законах роста этих фаз в условиях сварки, фрактального подхода к описанию структуры металла шва и адекватных методик оценки его свойств.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена совокупность научных положений, позволяющих при использовании модифицирования металла сварного шва через электродное покрытие целенаправленно воздействовать на процессы, определяющие структуру и свойства металла сварного шва:

* Разработана концепция рациональной температуры выделения модифицирующих фаз для условий кристаллизации металлов при сварке, позволившая определить концентрационные пределы оптимального введения модификатора;
* Разработана кинетическая модель роста модифицирующих фаз в металле шва с учетом температурных и временных особенностей сварки, позволяющая оценить размер модифицирующих фаз;
* Впервые в металловедении сварки разработан и применен метод фрактального анализа структурообразования сварных швов, определена фрактальная размерность - количественный показатель степени однородности металла сварных швов; показана большая информативность этого показателя по сравнению с традиционным критерием «балл зерна»; установлена связь фрактальной размерности структуры металла сварных швов с показателями хладостойкости.

Разработанный научный подход к решению задачи управления структурообразованием при модифицировании на основе модельных представлений актуален не только для низкоуглеродистых сталей, но и для низколегированных сталей того же структурного класса, таких как стали 15Х, 20Х и др.

Создана экспресс-методика оценки хладостойкости по температурному коэффициенту твердости, не требующая трудоемкой подготовки образцов, позволившая оценить критическую температуру хрупкости металла сварного шва.

Для оценки стабильности горения дуги была разработана методика, основанная на измерении амплитуды переменной составляющей сварочного тока.

Работа имеет практическую значимость: разработанные

математические модели и методики оценки сварочно-технологических свойств использованы ЗАО «Уральские электроды» при создании новых марок электродных покрытий серии ЭЛУР и получили положительную оценку в Уральском представительстве Шведского концерна ESAB ЗАО «Уралэлектросварка».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стомахин А.Я. К вопросу об оптимальном легировании стали нит­ридообразующими элементами // Изв. вузов. Черная металлургия. 1979. № 1. С.47-51.**
2. Котельников Г.И., Стомахин А.Я., Серьезнов В.Н. и др. Оценка оптимальных концентраций нитридообразующих элементов в ста­ли // Изв. вузов. Черная металлургия. 1979. № 1. С.42-46.
3. Ершов Г.С., Бычков Ю.Б. Физико-химические основы рациональ­ного легирования сталей и сплавов. М., 1982. 376 с.
4. Григорян В. А., Стомахин А .Я., Пономаренко А.Г. и др. Физико­химические расчёты электросталеплавильных процессов. М., 1989. 288 с.
5. Волченко В.Н., Ямпольский В.М., Винокуров В.А. и др. Теория сварочных процессов/ Под ред. В.В.Фролова. М.; 1988. 559 с.
6. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением М., 1997 с.
7. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегиро­вание чугуна и стали. М., 1986. 272 с.

*г*

1. Панасюк А.Д., Фоменко B.C., Глебова Г.Г. Стойкость неметалли­ческих материалов в расплавах. Киев, 1986. 352 с.
2. Лепинских Б.М., Кайбичев А.В., Савельев Ю.А. Диффузия эле­ментов в жидких металлах группы железа. М., 1974. 192 с.

Ю.Походня И.К. Газы в сварных швах. М., 1972. 256 с.

1. Куликов И.С. Раскисление металлов. М., 1975. 504 с.
2. Походня И.К. Металлургия сварки. Состояние и проблемы // Сварка и родственные технологии в XXI век: Тез. докл. Киев, 1998. С. 99-100.
3. Новожилов Н.М. Основы металлургии дуговой сварки в газах. М., 1979. 231 с.
4. Потапов Н.Н. Основы выбора флюсов при сварке сталей. М., 1979. 168 с.
5. Турчанин А.Г., Турчанин М.А. Термодинамика тугоплавких кар­бидов и карбонитридов. М., 1991. 352 с.