

*На правах рукописи*

**МАТАФОНОВ АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ  
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

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

Барнаул – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук,  
профессор **Руш Елена Анатольевна**, ФГБОУ  
ВПО «Иркутский государственный университет  
путей сообщения», зав. кафедрой

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор  
**Макиенко Виктор Михайлович** ФГБОУ ВПО  
«Дальневосточный государственный университет  
путей сообщения», зав. кафедрой

кандидат технических наук, профессор  
**Чепрасов Дмитрий Петрович**, ФГБОУ ВПО  
«Алтайский государственный технический  
университет им. И.И.Ползунова», профессор

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВПО «Ангарская государственная  
техническая академия»

Защита состоится «29» марта 2012 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Ленина, 46, тел. (факс) 8(3852) 29-07-65, e-mail: [yuoshevtsov@mail.ru](mailto:yuoshevtsov@mail.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Автореферат разослан «28» февраля 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Ю.О. Шевцов

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность исследований.** Создание новых сварочных материалов, обладающих высокими физико-механическими и технологическими свойствами, а также разработка экономичных и экологически безопасных технологий их получения является важной народнохозяйственной задачей. Для Восточной Сибири эта проблема представляется весьма актуальной, вследствие отсутствия развитой промышленной базы для переработки и производства материалов.

В зависимости от функционального назначения химический состав покрытий сварочных электродов разнообразен и требует строгого выполнения определенных условий по рецептуре. В настоящий момент российские производители покрытых металлических электродов испытывают хронический дефицит основных и вспомогательных сырьевых материалов, входящих в состав электродных покрытий. Поставщики сырья, находящиеся за пределами РФ, определяют условную политику в электродном производстве, в частности, в Восточно-Сибирском регионе. В связи с этим появилась необходимость изучения регионального сырьевого комплекса, как эффективного средства минимизации затрат на производство сварочных материалов. На территории Восточно-Сибирского региона имеются большие запасы разведанного минерального сырья и отходов горно-обогатительных, металлургических, целлюлозно-бумажных производств, пригодных для получения отдельных компонентов и химических соединений, входящих в состав покрытий сварочных электродов, шихты порошковых проволок, флюсов. Вовлечение этих ресурсов в производство поможет решить проблему поиска недорогих импорт-заменяющих сварочных материалов.

Замена традиционного сырья на сырье, полученное из других месторождений, является и теоретической задачей, требующей постановки дополнительных экспериментальных исследований и модельных испытаний по определению составов сварочных материалов, формированию на их основе новых рецептур. Одним из возможных инструментов ее решения является термодинамическое моделирование, позволяющее исследовать равновесие многокомпонентных систем.

**Цель исследований** – обоснование возможности вовлечения компонентов минерального сырья Восточно-Сибирского региона в производство электродных покрытий и разработка на их основе состава покрытия электрода типа Э-10Г2СХ для ручной дуговой наплавки.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие **задачи**:

- изучить состав и свойства минерального сырья Восточной Сибири на перспективу их использования в качестве традиционных компонентов покрытий сварочных электродов;
- проанализировать традиционные шлаковые диаграммы состояния неметаллических веществ, применительно к сырью Восточно-Сибирского региона;
- разработать термодинамическую модель плавления электрода, полученного на основе использования компонентов минерального сырья Восточно-Сибирского региона, доказать ее адекватность экспериментальным данным;
- оценить сварочно-технологические свойства разработанного электрода.

**Научная новизна:**

- впервые выполнено комплексное исследование потенциальных компонентов сварочных материалов на основе сырья из месторождений Восточно-Сибирского региона;
- на основе результатов термодинамического моделирования теоретически обоснован выбор компонентов минерального сырья, пригодного для производства сварочных электродов;

– экспериментально доказана возможность использования мрамора, магнезита и плавленого шпата рассматриваемых месторождений в составе покрытия сварочного электрода;

- опытным путем дана оценка сварочно-технологическим свойствам электродов с разработанным составом покрытия на основе минерального сырья Восточно-Сибирского региона.

**Практическая ценность** работы заключается в разработке термодинамической модели плавления электрода, позволяющая существенно минимизировать затраты на корректировку традиционных и разработку новых сварочных покрытий.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований предложен опытный состав покрытия электрода, соответствующего типу Э-10Г2СХ. Результаты исследований подтверждены актами опытно-сравнительных испытаний.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Изучение состава и характеристик компонентов сварочных материалов из минерального сырья Восточно-Сибирского региона.

2. Способ расчета компонентного состава сварочных электродов.

3. Составы возможных композиций сварочных материалов с использованием компонентов сырья Восточно-Сибирского региона, рассчитанные на основе результатов термодинамического моделирования.

4. Результаты технологических испытаний.

#### **Обоснованность и достоверность результатов**

Достоверность и обоснованность основных научных результатов обеспечивалась многократным воспроизводством в модели экспериментальных данных, полученных различными методами исследования. Обоснованность предлагаемой рецептуры покрытия нового электрода подтверждена опытными испытаниями на объектах ВСЖД – филиала ОАО «Российские железные дороги».

#### **Личный вклад автора**

Исследования, представленные в диссертации, являются результатом работы автора, который самостоятельно выполнял термодинамические расчеты и экспериментальные исследования, внес значительный вклад в обработку результатов термодинамического моделирования и подготовку научных публикаций. Автор лично принимал участие во всех стадиях опытных испытаний сварочных электродов с новыми компонентами в составе покрытия.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международной научной конференции: «Технические, экономические и экологические проблемы транспорта» (Брянск, 2008); на Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: «Интеллект - 2008» (Красноярск, 2008); на научно-практической конференции с международным участием: «Технические, экономические и экологические проблемы транспорта» (Иркутск, 2009); на научно-практической конференции с международным участием: «Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог» (Иркутск, 2009); на научно-практической конференции молодых ученых: «Современность в творчестве вузовской молодежи». (Иркутск, 2009); на V конгрессе обогатителей стран СНГ (Москва, 2009); на Всероссийском конкурсе молодежных авторских проектов «Моя страна – моя Россия» (Москва, 2009). По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе, три статьи в журналах, рекомендуемых ВАК России.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и приложения общим объемом 154 страницы, включая 30 таблиц, 18 рисунков и списка цитируемой литературы из 123 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** рассмотрено современное состояние проблемы обеспеченности отечественных производителей сварочных материалов сырьем, обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** приведен подробный анализ современного состояния сырьевой базы для изготовления сварочных материалов с использованием различных компонентов в составе покрытий, представлена характеристика нестандартных компонентов в рецептуре новых сварочных материалов, используемых в современных технологических процессах, рассмотрена методология создания новых сварочных материалов.

Результаты анализа показывают слабую изученность поиска нового сырья на территории Восточно-Сибирского региона в качестве компонентов сварочных материалов. Поэтому требуется систематическое изучение минерального и химического состава сырья, а также разработка новых составов электродных покрытий.

**Во второй главе** приведены материалы и методы исследований опытных наплавочных электродов, выполнен химический, элементный и фазовый анализ минерального сырья Восточно-Сибирского региона. На основе результатов анализа произведен выбор компонентов электродных покрытий.

Экспериментальные исследования по разработке электродов для наплавки деталей железнодорожного транспорта с использованием минерального сырья Восточной Сибири проводились в лабораторных условиях на базе Иркутского государственного университета путей сообщений и Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН.

При постановке исследований использовалось современное отечественное и импортное оборудование, а испытания материалов проводились в соответствии с государственными стандартами и инструкциями НАКС.

При разработке новых электродных покрытий применен метод термодинамического моделирования, который позволил получить необходимые термодинамические характеристики минерального сырья и оптимизировать процесс создания новых электродов.

Для расчета сложных термодинамических реакций использовался программный комплекс «Селектор», обладающий универсальностью, эффективностью и большим диапазоном возможностей.

В качестве металлического стержня применялась стандартная сварочная проволока Св-08А диаметром 4 мм по ГОСТ 2246-70. При разработке электродов на основе сырья месторождений Восточной Сибири в шихте использованы: магнезит – Савинское месторождение (табл.1), мрамор – карьер «Перевал» г. Слюдянка (табл. 2), плавиковый шпат - Абагайтуйское месторождение (табл. 3), периклазовый концентрат – ОАО «Сибирские порошки» пос. Михайловка (табл. 4), ферросилиций – ОАО «Братский завод ферросплавов» г. Братск, ферромарганец – ООО «Химико-марганцевая компания» г. Ангарск, алюминиевый порошок – «Иркутский алюминиевый завод». Остальные компоненты в составе покрытия (рутил, органические пластификаторы, феррохром, феррованадий, железный порошок) не изменялись, являясь традиционными.

Таблица 1 – Химический состав магнезитовых руд Савинского месторождения, (%)

| MgO  | CaO | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | П.п.п. |
|------|-----|------------------|--------------------------------|--------|
| 44,5 | 2,4 | 7                | -                              | 49     |

Таблица 2 – Химический состав проб мраморов месторождения «Перевал», (%)

| № пробы | SiO <sub>2</sub> | CaO  | MgO | FeO | MnO | CO <sub>2</sub> |
|---------|------------------|------|-----|-----|-----|-----------------|
| 1       | 0,4              | 50,7 | 4,8 | 0,2 | 0,8 | 43,4            |

|   |     |      |     |     |     |      |
|---|-----|------|-----|-----|-----|------|
| 2 | 0,7 | 51,2 | 3,6 | -   | 0,1 | 43,7 |
| 3 | 1,2 | 49,6 | 6,4 | 0,3 | 0,4 | 42,2 |

Таблица 3 – Химический состав плавленого шпата Абагайтуйского месторождения, (%)

| № пробы | CaF <sub>2</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaCO <sub>3</sub> | S    | P    |
|---------|------------------|------------------|-------------------|------|------|
| 1       | 93,81            | 5,09             | 1,02              | 0,05 | 0,03 |
| 2       | 93,68            | 5,21             | 1,03              | 0,05 | 0,03 |
| 3       | 94,03            | 4,94             | 0,95              | 0,05 | 0,03 |

Таблица 4 – Химический состав порошка периклазового марки ППЭ-88, (%)

| MgO  | CaO  | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 88,1 | 1,85 | 4,0              | 2,8                            | 0,35                           |

В исследуемых пробах месторождения «Перевал» содержится достаточно высокое содержание магния, поэтому проведены дополнительные исследования по определению фазового состава мрамора (рис. 1) с целью выявления процентного содержания доломита (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>). Исследования показали, что содержание CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> варьируется от 35 до 40% и CaCO<sub>3</sub> – от 50 до 55%. Повышенное содержание доломита может негативно повлиять на газшлаковую защиту металла шва.

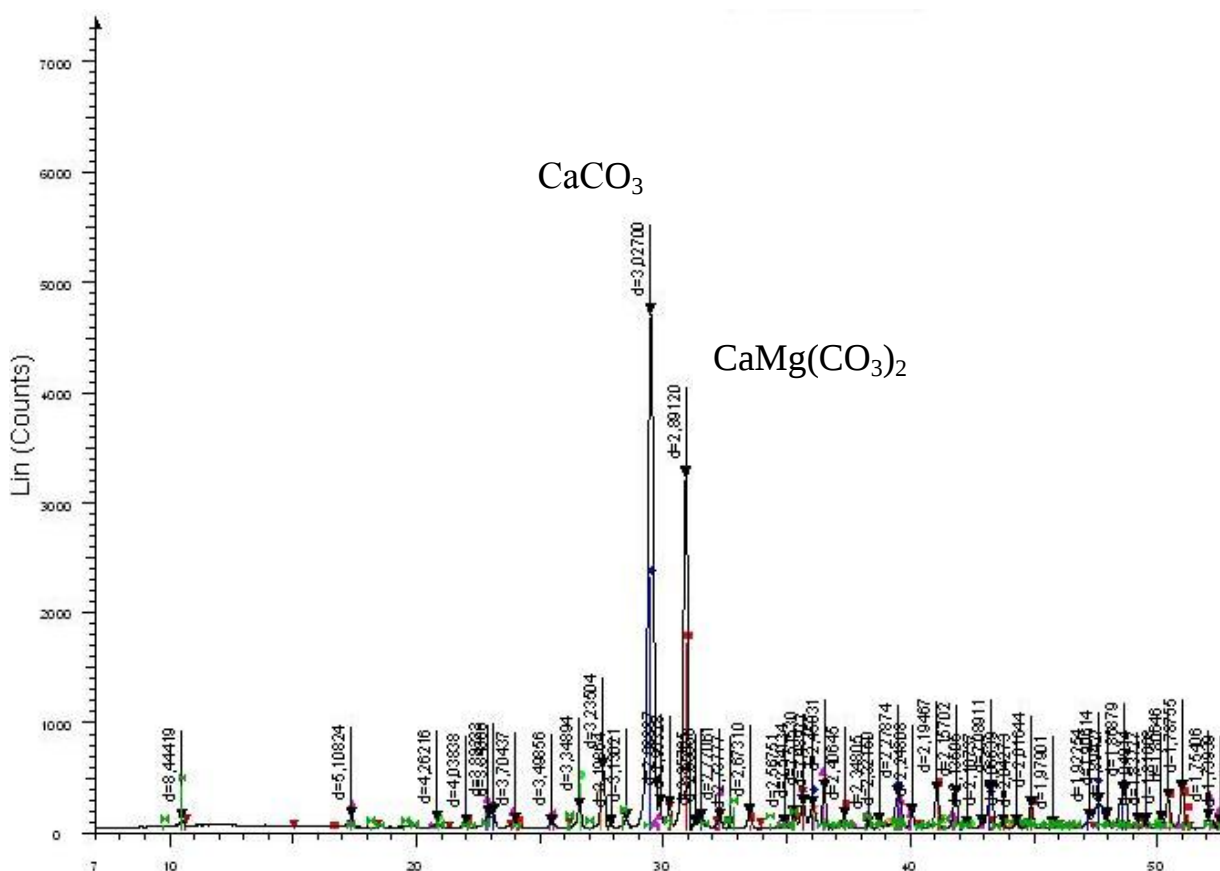


Рис. 1. Фазовые линии элементов мрамора карьера «Перевал»

Для оценки химического, элементного, а также фазового состава отобранных проб месторождений Восточной Сибири, и полученных в процессе наплавки сварочных

шлаков, применялись рентгеноспектральный, флуоресцентный и рентгенодифракционный анализы.

Содержание диффузионно-подвижного водорода в металле шва определяли методом «карандашных проб».

Испытания разработанных электродов производились в соответствии с ГОСТ-9466. Для определения твердости наплавленного металла и механических свойств на пластину из стали марки Ст3сп ГОСТ 380 выполняли многослойную наплавку с межваликовой температурой на последнем слое не выше  $25\pm 5^\circ\text{C}$ . Размеры пластины  $120\times 80\times 20$  мм (с предельными отклонениями длины и ширины  $\pm 5$  мм, толщины  $\pm 2$  мм), площадь наплавки  $80\times 90$  мм. Ширина наплавляемых валиков не менее 15...18 мм. Измерение твердости наплавленного металла осуществлялось по ГОСТ-9012, механические испытания по ГОСТ 6996. Для испытаний на разрыв и ударную вязкость вырезали по 3 образца (вдоль наплавки) тип – II и VI.

При наплавке, согласно требованиям РД 03-613-03, разработанным СРО НП «НАКС», оценивались следующие сварочно-технологические показатели: род тока, полярность, легкость возбуждения и стабильность горения дуги, качество формирования шва, эластичность дуги, производительность наплавки, отделимость шлаковой корки, ширина валиков, формирование поверхности, пористость.

Пробы для химического и спектрального анализов наплавленного металла отбирали из двух верхних слоев образца.

Химический состав наплавленного металла определялся по ГОСТ 12344 – 12348, ГОСТ 12350, ГОСТ 12351, ГОСТ 12356, ГОСТ 18895.

Рассмотрена методика получения наплавочных электродов для восстановления узлов и деталей железнодорожного транспорта, основанная на методах термодинамического моделирования. Для того, чтобы получить сварочный материал с заданными свойствами, требуется длительное время. Поэтому на современном этапе развития технологий создания новых сварочных материалов интенсивно развиваются компьютерные методы их построения, которые позволяют сократить трудоемкость разработки.

При разработке новых покрытий электродов используются, как сырьевые, так и не сырьевые компоненты, содержащие элементы примеси. Их присутствие в месторождениях минерального сырья Восточной Сибири существенно усложняют расчет по экспериментальной методике. Главные препятствия на пути эксперимента: многокомпонентность систем, неравновесность многих реакций, необходимость упрощения систем и проведения большого числа экспериментальных исследований.

Термодинамическое моделирование практически не имеет этих ограничений. Тем не менее, экспериментальное изучение простых систем с точно контролируемыми параметрами дает необходимые данные для получения термодинамических характеристик. Опорные экспериментальные исследования сложных систем, в случае их безусловной надежности, являются хорошим контролем данных количественного термодинамического расчета. Завершающим этапом моделирования является не только создание компьютеризированной модели горения сварочного электрода, но и доказательство ее адекватности в прямых экспериментальных работах.

Для расчета химических равновесий металлургических процессов в сварочной ванне программный комплекс обеспечивает:

1. Полноту, детальность и точность математического представления термодинамических моделей в многокомпонентных, многофазных и многоагрегатных системах, в которых число потенциально возможных в равновесии фаз может значительно превышать число независимых компонентов.

2. Наложение одно-, двухсторонних ограничений на часть или все искомые мольные количества зависимых компонентов, введение дополнительных критериальных

функций, расчеты неполных, промежуточных, частичных, условных и метастабильных равновесий.

3. Постановку и решение широкого класса обратных термодинамических задач.

4. Изучение термодинамической эволюции в совокупности взаимодействующих систем, связанных между собой и с окружающей средой прямыми и обратными потоками вещества и энергии – модели термодинамических магистралей в динамических мегасистемах.

5. Наличие надежного и безотказного алгоритма расчета химических равновесий в многокомпонентных, многофазных и многоагрегатных мультисистемах с различным типом равновесия по независимым параметрам состояния и с учетом введения дополнительных ограничений на искомые мольные количества зависимых компонентов,

6. Решение задач с сильным отклонением от идеальности и возможностью расслоения твердых и жидких растворов, включая силикатные расплавы.

Программный комплекс «Селектор», используемый в данной работе, предназначен для расчетов сложных химических равновесий в системах, когда число фаз, потенциально возможных в равновесии, превышает число независимых компонентов. Среди потенциально возможных в равновесии и в решении фаз могут одновременно присутствовать: смесь газов, твердые углеводороды, минералы в виде твердых растворов и однокомпонентных фаз, расплавы и плазма. Изучение неравновесной и метастабильной эволюции систем выполняется на основе принципа частичного равновесия.

База термодинамических данных включает наборы параметров уравнений, аппроксимирующих основные термодинамические характеристики индивидуальных веществ: минералы, газы, углеводороды, компоненты ионизированной плазмы. Для расчета изотермических изменений термодинамических функций используются: уравнение состояния Мурнагана для конденсированных фаз, уравнение состояния Ли-Кеслера для жидких и газообразных углеводородов и полуэмпирические уравнения состояния газов в приведенных параметрах по Гангули, Саксена, Фея, Спейшера, Рида, охватывающие большую область высоких температур и давлений.

Для ряда индивидуальных веществ, образующихся в процессе сварки, отсутствует ряд термодинамических характеристик, необходимых при моделировании высокотемпературных процессов, и, поэтому, в работе был проведен расчет этих параметров.

**Третья глава** посвящена разработке опытных наплавочных электродов на основе минерального сырья Восточной Сибири, используемых для восстановления геометрических параметров деталей железнодорожного транспорта. Для получения электродов с качественными физико-химическими и механическими показателями была разработана схема, показывающая весь путь от подготовки исходных данных до выхода готовой продукции. Разработан оптимальный состав шихты и получены опытные электроды, обеспечивающие требуемые свойства процесса сварки, на основе использования метода термодинамического моделирования.

Электроды, полученные на основе минерального сырья Восточной Сибири, должны удовлетворять по физико-механическим характеристикам техническим условиям традиционных электродов АНП-13 (ТУ-1272-035-01124328-96) и обеспечивать хорошую комбинированную газошлаковую защиту сварочной ванны от воздействия внешней среды; устойчивое горение сварочной дуги; необходимые условия для качественного формирования шва, легкого отделения шлаковой корки, минимального разбрызгивания металла на угар; свойства наплавленного металла, не ниже свойств, получаемых при наплавке электродами типа Э-10Г2СХ по ГОСТ 10052 и ТУ-1272-035-01124328-96.

Покрытие наплавочного электрода марки АНП-13 состоит из в масс. %: мрамор – 10...18, рутил – 12...17, плавиковый шпат – 4...8, полевого шпат – 2,5...4,5, ферромарганец – 5,5...7,5, ферросилиций – 3,2...5, алюминиево-магниевый порошок – 0,3...1, органические пластификаторы – 1...1,9, феррохром углеродистый – 0,6...1,1,

феррованадий – 0,05...0,15, железный порошок – 50...60. В качестве электродного стержня применяется низкоуглеродистая проволока Св-08А.

Получение электродов с качественными физико-химическими и механическими показателями реализовывалось по схеме, представленной на рис. 2.

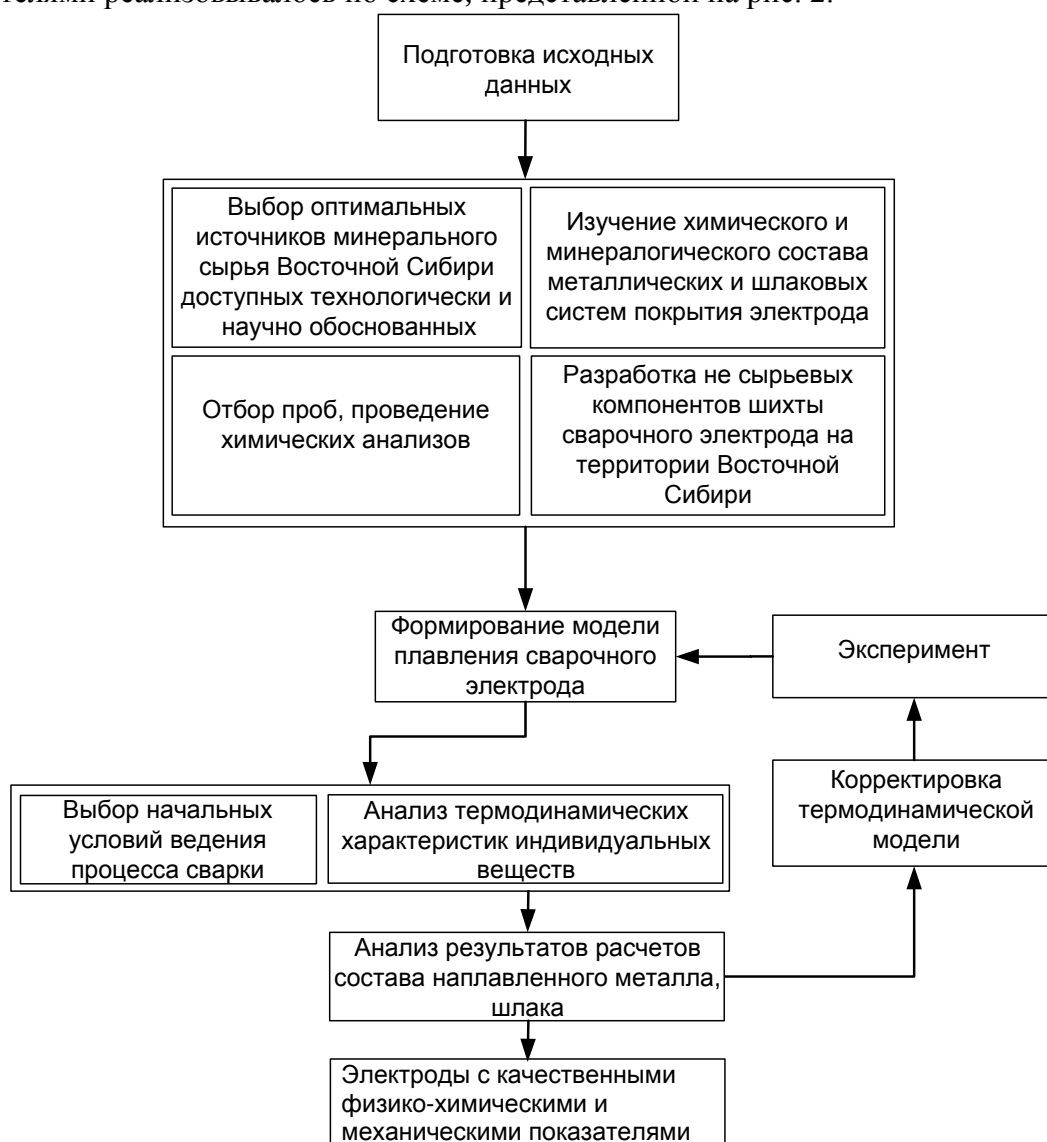


Рис. 2. Схема создания сварочных электродов на основе минерального сырья Восточной Сибири с помощью термодинамического моделирования

Для построения термодинамической модели плавления электрода в программе заданы внешние условия, в которых находилась система и ее химический состав. На основе анализа диаграмм фазовых состояний создан набор фаз, образование которых наиболее вероятно в сварочной ванне.

При проведении исследований в лабораторных условиях на постоянных в пределах экспериментов материалах (проволока, растворы связующего стекла, ферросплавов), с помощью термодинамического моделирования производили корректировку химического состава шихты покрытия. После этого изготавливали опытные электроды и сопоставляли экспериментальные данные с расчетными параметрами.

Процесс плавления в термодинамической модели рассматривали при температурах от 1000 до 2400 °С с шагом 100 °С. В этих интервалах температур протекают основные процессы плавления сварочных электродов, включающие диссоциацию газообразующих компонентов, раскисление, окисление, рафинирование.

Расчет равновесного состава металла и шлака, отражающего процесс охлаждения сварочной ванны, производили с помощью создания дополнительной модели, которая представляет собой этапы кристаллизации наплавленного металла и затвердевания шлака при температурах 2200...2400 °С – усредненная температура сварочной ванны; 1500...1600 °С – начало кристаллизации компонентов в сварочной ванне; 200...300 °С – завершение кристаллизации.

В соответствии со спецификой металлургии сварочных процессов заданы параметры подвижности каждого компонента в газовой, шлаковой фазе и в расплаве.

Рабочий список потенциально возможных компонентов, характеризующих систему процесса плавления электрода АНП-13 в равновесии, включает 19 независимых компонентов Al-Si-Fe-Ca-Ti-Na-Cu-Mg-Mn-Cr-V-Zr-O-H-C-K-F-S-P; 75 компонентов газовой фазы, 193 компонента твердых фаз и 49 компонентов расплавленной фазы. Основные зависимые компоненты модели представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Основные зависимые компоненты модели  
Al-Si-Fe-Ca-Ti-Na-Cu-Mg-Mn-Cr-V-Zr-O-H-C-K-F-S-P

| Газовая фаза: H, H <sub>2</sub> , OH, HF, O, CO, CO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, SiF <sub>4</sub> , MnO                                                                                                 |                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Шлаковая фаза                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                       |
| Кварц - SiO <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                           | Родонит - MnSiO <sub>3</sub>                                          |
| Рутил - TiO <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                           | Силикат - Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                            |
| Корунд - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                                                                            | Перовскит - CaTiO <sub>3</sub>                                        |
| Вюстит - FeO                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Калиевый полевошпат - K <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>6</sub> |
| Гематит - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                                                                           | Альбит - Na <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>6</sub>             |
| Периклаз - MgO                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Сфен - CaTiSiO <sub>5</sub>                                           |
| Оксид кальция - CaO                                                                                                                                                                                                                                                                                | Сульфид кальция - CaS                                                 |
| Сульфид марганца - MnS                                                                                                                                                                                                                                                                             | Манганозит - MnO                                                      |
| Сульфид железа - FeS                                                                                                                                                                                                                                                                               | Ранкинит - Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>             |
| Двуокись циркония - ZrO <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                               | Авгит - CaAl <sub>2</sub> SiO <sub>6</sub>                            |
| Плавиковый шпат - CaF <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                 | Герценит - FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                           |
| Карбонат кальция - CaCO <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                                                                               | Фосфат кальция - CaP <sub>2</sub> O <sub>6</sub>                      |
| Волластонит - CaSiO <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                   | Калиофелит - K <sub>2</sub> FeSiO <sub>4</sub>                        |
| Двухкальцевый феррит - 2FeMnO <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                         | Марокит - CaMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                            |
| Клиноэнстатит - MgSiO <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                 | Пироксен - FeSiO <sub>3</sub>                                         |
| Ильменит - FeTiO <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                       |
| Дисиликат калия - K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                       |
| Расплав: C, Fe, V, Cr, Al, Mg, Mn, MnO, Si, P, S, SiO <sub>2</sub> , FeO, MnO, Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , Fe <sub>3</sub> C, FeS, VO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Ca, CaO, CaF <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> |                                                                       |

В результате термодинамического моделирования установлено, что химический состав металла электрода АНП-13 удовлетворяет предъявляемым требованиям. Шлаковая фаза по химическому составу незначительно отличается от реальных шлаков. Газовая фаза представлена продуктами высокотемпературного преобразования карбонатов, рутила, калиево-натриевого стекла, плавикового шпата, главным образом CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, HF, SiF<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O.

На основе термодинамической модели процесса плавления электрода, протестированной по результатам плавления электродов АНП-13, построена модель плавления опытного электрода, в которой стандартные компоненты шихты заменены на региональные: мрамор плавиковый шпат, периклазовый порошок и алюминиевый порошок. Согласно результатам моделирования, опытные электроды, по сравнению с АНП-13, характеризуется более низким содержанием CO<sub>2</sub> и увеличением содержания закиси железа в шлаковой фазе. Это подтвердило предположение о неудовлетворительном качестве мраморов с месторождения «Перевал», поэтому в состав покрытия

дополнительно введен магнезит. Оптимальное соотношение мрамора и магнезита определяли за счет введения в модель, автоматически изменяющихся соотношений мрамора и магнезита в интервале от 0,1 часть мрамора – 0,9 частей магнезита, и 0,9 частей мрамора – 0,1 магнезита частей, с шагом 0,1.

В результате было определено оптимальное соотношение мрамора – магнезита 0,4 – 0,6 частей, соответственно. Компонентный состав полученных электродов приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Компонентный состав электродных покрытий

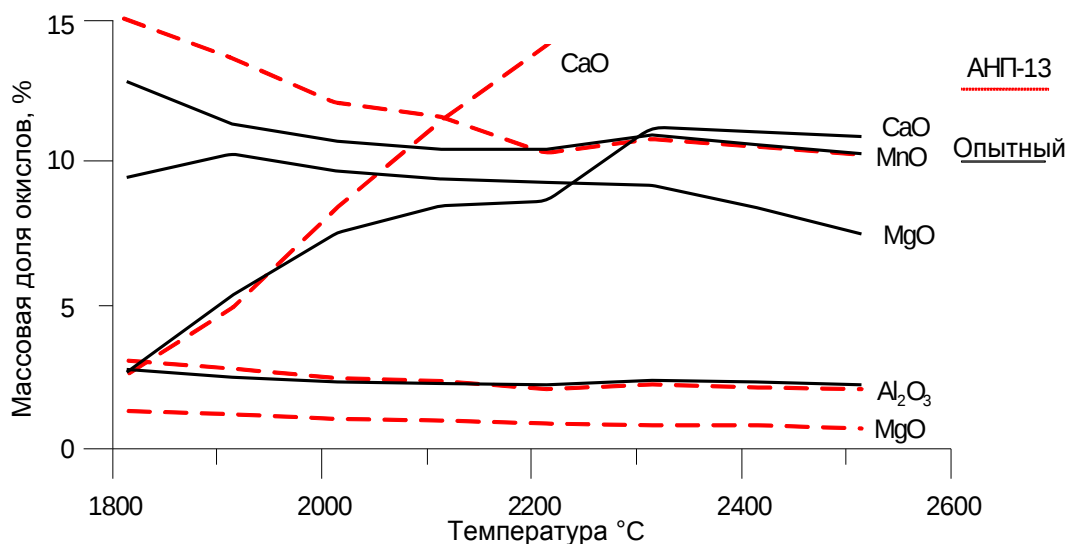
| Наименование компонентов                    | Стандарт   | Массовая доля компонентов, % |            |
|---------------------------------------------|------------|------------------------------|------------|
|                                             |            | АНП-13                       | Опытный    |
| Мрамор                                      | ГОСТ 4416  | 10..18                       | -          |
| Мрамор, карьер «Перевал»                    | ТУ         | -                            | 7..12      |
| Магнезит                                    | ТУ         | -                            | 5..8       |
| Плавиковый шпат                             | ГОСТ 4421  | 4..8                         | 4..8       |
| Рутиловый концентрат                        | ГОСТ 22938 | 12..17                       | 12..17     |
| Полевой шпат                                | ГОСТ 4422  | 2,5..4,5                     | -          |
| Периклазовый концентрат                     | ГОСТ 24862 | -                            | 2,5..4,5   |
| Ферромарганец                               | ГОСТ 4755  | 5,5..7,5                     | 5,5..7,5   |
| Ферросилиций                                | ГОСТ 1415  | 3,2..5                       | 3,2..5     |
| Феррохром                                   | ГОСТ 4757  | 0,6..1,1                     | 0,6..1,1   |
| Феррованадий                                | ГОСТ 4760  | 0,05..0,15                   | 0,05..0,15 |
| Алюминиево-магнийевый порошок               | ГОСТ 5593  | 0,3..1                       | 0,3..1     |
| Железный порошок                            | ГОСТ 9849- | 50..60                       | 50..60     |
| Целлюлоза                                   | ТУ         | 1,1..1,5                     | 1,1        |
| Натрий карбоксиметилцеллюлоза очищенная КМЦ | ОСТ        | 0,3..0,6                     | 0,3        |
| Силикат калиево-натриевый                   | ТУ         | 22..27                       | 22...27    |

Согласно данным термодинамического моделирования плавления шлаковых систем АНП-13 и опытного электрода в интервале температур 1800...2500 °С (рис.3), установлены следующие закономерности. При температуре 1800 °С происходит полное расплавление электрода. В интервале температур 1800...2000 °С содержание окислов железа в шлаковой фазе незначительно снижается, или остается, практически, без изменения. Расплавление введенных в состав покрытия интерметаллидов ферромарганца и ферросилиция в интервалах температур 2200...2300 °С существенно снижает их содержание. Таким образом, при увеличении температуры происходит интенсивный переход железа из металла в шлак. Следовательно, при качественной газошлаковой защите и введении достаточного количества раскислителей, процесс снижения содержания окислов железа в наплавленном металле можно оптимизировать. Этот факт подтверждается, как экспериментальными исследованиями, так и результатами термодинамического моделирования.

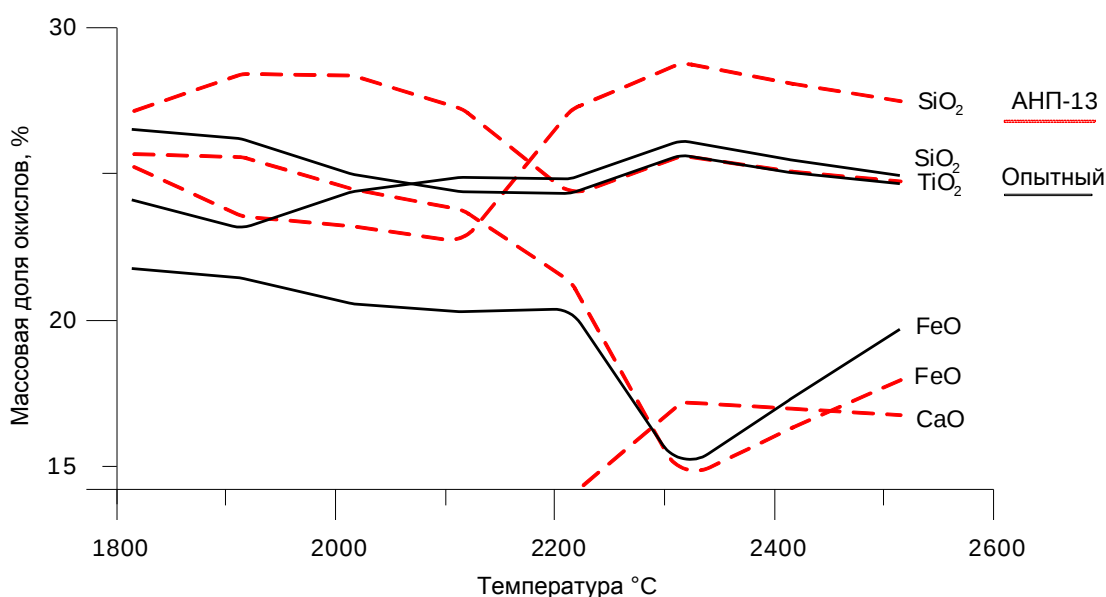
С помощью термодинамической модели показано, что оптимальный состав шихты опытных электродов обеспечивается за счет замены 0,4 частей мрамора на магнезит. За счет этого обеспечивается необходимая шлаковая и газовая защита наплавленного металла.

Сформированная термодинамическая модель на примере электрода АНП-13 с высокой точностью на качественном и количественном уровне описывает процессы плавления. Достоверность расчетов подтверждена экспериментально.

Показано, что термодинамическое моделирование сварочных процессов, протекающих в высокотемпературных интервалах, методом минимизации термодинамических потенциалов, в отличие от других расчетных методов, основанных на константах равновесия химических реакций, позволяет определять направление протекания процессов в сварочной ванне, с высокой точностью оценивать равновесный состав гетерогенной системы газ – шлак – металл.



а) распределение SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-FeO-CaO в интервале температур 1800...2500 °C



б) распределение CaO-MnO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в интервале температур 1800...2500 °C

Рис. 3. Результаты термодинамического моделирования шлаковых систем электрода АНП-13 и опытного электрода на основе минерального сырья Восточно-Сибирского региона.

Для обеспечения требуемых защитных, металлургических, сварочно-технологических свойств полученных опытных электродов с покрытием из минерального сырья Восточно-Сибирского региона необходимо проверить, чтобы их физические свойства (температура плавления, поверхностное натяжение, вязкость, электропроводность) шлаковой системы были на уровне стандартных электродов АНП-13. Проверку производили по методике, предложенной учеными Д.П. Чепрасовым и С.В.

Кравченко, для многокомпонентной системы с известным оксидным составом по следующим уравнениям:

$$\text{для температуры плавления} - T = k_T \cdot \sum(C_i \cdot T_i^0) / 100\%, \quad (1)$$

$$\text{вязкости} - \eta = k_\eta \cdot \sum(C_i \cdot \eta_i^0) / 100\%, \quad (2)$$

$$\text{поверхностного натяжения} - \sigma = k_\sigma \cdot \sum(C_i \cdot \sigma_i^0) / 100\%, \quad (3)$$

$$\text{электропроводности} - k = k \cdot \sum(C_i \cdot \sigma_i^0) / 100\%, \quad (4),$$

где  $T, \eta, \sigma$  – температура плавления, вязкость, поверхностное натяжение, электропроводность шлаковой системы;  $C_i$  – массовая доля  $i$ -го оксида.  $T_i^0, \eta_i^0, \sigma_i^0, k_i^0$  – температура плавления, вязкость, поверхностное натяжение, электропроводность  $i$ -го оксида.  $k_T, k_\eta, k_\sigma, k$  – коэффициенты корреляции, для электродов с рутиловым и основным покрытием:  $k_T = 0.635, k_\eta = 0.16, k_\sigma = 0.915, k = 1.3 \dots 1.8$ .

Проведенные расчеты позволяют установить, что физические свойства опытных электродов незначительно отличаются от электродов АНП-13. В табл. 7 приведены физические свойства исследуемых шлаковых систем и известные физические свойства традиционных электродов МР-3 и УОНИ 13/45.

Таблица 7 – Физические свойства шлаковой системы опытных электродов

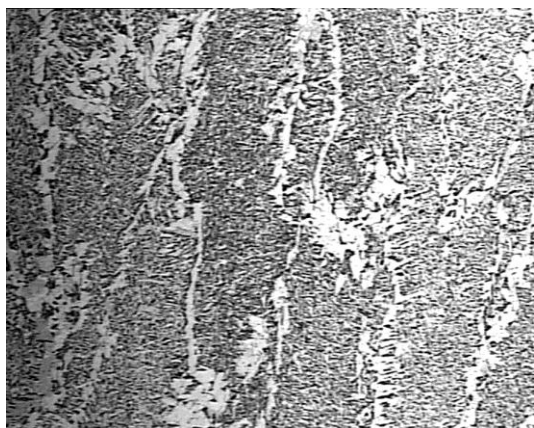
| Параметры                                                           | Марка электрода |        |                  |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------|--------|------------------|
|                                                                     | Опытный         | АНП-13 | МР-3, УОНИ 13/45 |
| $T_i^0, ^\circ\text{C}$                                             | 1200            | 1144   | 1150...1300      |
| $\sigma_i^0, \text{мН/м}$<br>(1300 $^\circ\text{C}$ )               | 317,05          | 311,7  | 315...395        |
| $\eta_i^0, \text{Па}\cdot\text{с}$ (1300 $^\circ\text{C}$ )         | 0,573           | 0,58   | 0,2              |
| $k_i^0, (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$<br>(1300 $^\circ\text{C}$ ) | 1,156           | 1,416  | 0,6...3          |

В четвертой главе реализованы результаты термодинамического моделирования, изучены сварочно-технологические свойства наплавленного металла опытных электродов на соответствие электродам марки АНП-13 (ТУ-1272-035-01124328-96), проведены исследования химического состава сварочных шлаков покрытий электродов, полученных на основе минерального сырья Восточной Сибири.

Для доказательства полученных результатов выполнены замесы опытных электродов, образцам присвоены номера – №1 (исходный) и №2 (откорректированный состав). В результате наплавки визуальным осмотром установлено, что на поверхности образцов наплавленными электродами №1 присутствуют незначительные скопления пор и шлаковых включений. У образцов №2 дефектов не обнаружено, отмечена хорошая делимость шлаковой корки. Таким образом, корректировка состава покрытия, выполненная за счет введения добавки магнетита в шихту, позволила добиться образования газов более качественного состава, что позволяет оптимально вести процесс сварки с помощью электрода с составом № 2.

Исследование экспериментальных электродов №1 и №2 из минерального сырья Восточной Сибири показали: микроструктура металла трех наплавленных образцов электрода марки опытного электрода №1 (рис. 4) имеет столбчатое строение и состоит из перлита. Феррит располагается по междендритным прослойкам. Наплавленный металл плотный. Несплавлений и микротрещин не обнаружено. В одном из трех исследованных образцов обнаружены шлаковое включение и пора, заполненная шлаком размером менее 0,1. Твердость наплавленного металла HV<sub>10</sub> 188 – 201; микроструктура наплавленного

металла опытного электрода №2 (рис. 5) мелкодисперсная, имеет столбчатое строение и состоит из перлита и феррита. Наплавленный металл плотный, несплавлений, шлаковых включений, микротрещин и пор в наплавленном металле исследуемых образцов не обнаружено. Твердость наплавленного металла  $HV_{10}$  233-252.

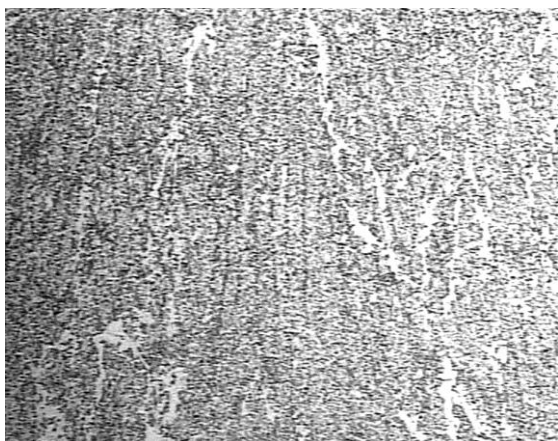


×100



×500

Рис. 4. Микроструктура наплавленного металла опытным электродом №1



× 100



× 500

Рис. 5. Микроструктура наплавленного металла опытным электродом №2

Химический анализ шлаков выполнен на рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 Pioneer (BrukerAXS, Германия) с рентгенооптической схемой по Соллеру. Для возбуждения флюоресценции использована рентгеновская трубка с анодом из Rh. Рентгеновское излучение регистрируют сцинтилляционный и проточно-пропорциональный счетчики.

Сравнение результатов термодинамического моделирования и химического анализа состава шлаков и наплавленного металла представлено в табл. 8, 9.

В целом состав фаз, образовавшихся в процессе сварки опытных электродов, соответствует составу фаз, образующихся при использовании электрода АНП-13.

В целях проверки сварочно-технологических характеристик полученных электродов изготовлена опытная партия. Наплавка выполнялась постоянным током обратной полярности на режиме:  $I_{св} = 160...180A$ ;  $U_d = 26...29V$ . Скорость наплавки была одинаковой и составляла  $\approx 8m/ч$ . При этом оценивались сварочно-технологические свойства, согласно требованиям РД 03-613-03, разработанным СРО НП «НАКС».

Результаты испытаний контролируемых параметров при определении сварочно-технологических свойств представлены в табл. 10.

Таблица 8 – Сопоставление результатов химического анализа шлаков с результатами термодинамического моделирования (%)

| Марка электрода      | TiO <sub>2</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO   | MnO   | MgO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> |
|----------------------|------------------|------------------|-------|-------|-------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|-----------------|
| АНП-13 <sup>1</sup>  | 26,33            | 24,65            | 22,07 | 9,77  | 0,43  | 4,22                           | 5,56                           | 4,04              | 2,68             | 0,26                           | 0,04            |
| АНП-13 <sup>2</sup>  | 27,27            | 28,04            | 21,20 | 11,90 | 1,06  | 5,30                           | 2,40                           | 2,10              | 1,42             | 0,20                           | 0,04            |
| Опыт-№1 <sup>1</sup> | 29,04            | 21,29            | 16,43 | 13,71 | 4,78  | 5,97                           | 2,92                           | 1,93              | 3,48             | 0,45                           | 0,06            |
| Опыт-№1 <sup>2</sup> | 29,46            | 21,78            | 16,24 | 14,20 | 4,86  | 5,86                           | 2,86                           | 1,78              | 3,41             | 0,30                           | 0,04            |
| Опыт-№2 <sup>1</sup> | 29,31            | 21,63            | 12,68 | 12,10 | 11,18 | 4,04                           | 3,31                           | 1,92              | 3,38             | 0,47                           | 0,10            |
| Опыт-№2 <sup>2</sup> | 29,48            | 21,39            | 13,14 | 12,56 | 11,46 | 3,94                           | 3,11                           | 1,82              | 3,26             | 0,30                           | 0,04            |

Таблица 9 – Сопоставление результатов термодинамического моделирования и химического состава металла

| Марка электрода      | Массовая доля элементов, % |           |         |         |        |         |         |
|----------------------|----------------------------|-----------|---------|---------|--------|---------|---------|
|                      | C                          | Si        | Mn      | Cr      | V      | S       | P       |
| АНП-13 <sup>1</sup>  | ≤ 0,15                     | 0,50-0,90 | 1,8-2,5 | 0,4-0,6 | ≤ 0,08 | ≤ 0,030 | ≤ 0,030 |
| АНП-13 <sup>2</sup>  | 0,08                       | 0,85      | 2,56    | 0,84    | 0,07   | 0,019   | 0,024   |
| Опыт-№1 <sup>1</sup> | 0,11                       | 0,72      | 1,86    | 0,44    | 0,06   | ≤ 0,030 | ≤ 0,030 |
| Опыт-№1 <sup>2</sup> | 0,08                       | 0,68      | 2,12    | 0,84    | 0,07   | 0,019   | 0,024   |
| Опыт-№2 <sup>1</sup> | 0,11                       | 0,78      | 2,34    | 0,46    | 0,06   | ≤ 0,030 | ≤ 0,030 |
| Опыт-№2 <sup>2</sup> | 0,08                       | 0,68      | 3,01    | 0,84    | 0,07   | 0,019   | 0,024   |

Примечание: 1- Экспериментальные данные, 2- Результаты термодинамического моделирования.

Таблица 10 – Сварочно-технологические свойства серийных опытных электродов

| Марка электрода                  | Опытный         | АНП-13          |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| Возбуждение дуги                 | Хорошее         | Хорошее         |
| Стабильность горения дуги        | Высокая         | Высокая         |
| Отделимость шлаковой корки       | Хорошая         | Хорошая         |
| Эластичность дуги                | Хорошая         | Хорошая         |
| Формирование поверхности валиков | Мелкочешуйчатая | Мелкочешуйчатая |
| Пористость                       | Пор нет         | Пор нет         |

Испытаниями установлено, что у опытных электродов хорошая отделимость шлаковой корки без усилий, формирование шва хорошее, формирование поверхности валика мелкочешуйчатое, разбрызгивание незначительное, пор в процессе наплавки не обнаружено; сварочно-технологические свойства соответствуют электродам АНП-13.

Содержание диффузионного водорода в наплавленном металле (табл. 11) определяли методом «карандашных проб».

Образцы для изучения механических характеристик вырезались из наплавленного металла на пластину из стали Ст3 по ГОСТ 6996.

Испытания проводили на универсальной испытательной машине LF 300, копер маятниковый «Walter+BaiAG», твердомер ТШ-2М.

На рис. 7 представлена торцевая часть образца вырезанного из наплавленного металла опытными электродами и результаты измерения твердости.

Внешний вид образцов после испытаний на растяжение и ударную вязкость представлены на рис. 8 и 9. Результаты механических испытаний представлены в табл. 12.

Таблица 11 – Содержание водорода в наплавленном опытными электродами металле

| Марка электрода | № эвдиометра | V, см <sup>3</sup> | P, гр  | [H], см <sup>3</sup> /100 г |
|-----------------|--------------|--------------------|--------|-----------------------------|
| АНП-13          | 1            | 0,65               | 15,582 | 4,17                        |
|                 | 2            | 0,9                | 23,161 | 3,89                        |
|                 | 3            | 0,7                | 17,640 | 3,97                        |
| Опытный         | 1            | 0,7                | 13,843 | 5,05                        |
|                 | 2            | 0,8                | 16,221 | 4,93                        |
|                 | 3            | 0,85               | 16,979 | 5,01                        |

Таблица 12– Механические характеристики металла при наплавке опытными электродами

| Марка электрода | Твердость наплавленного металла, НВ | Предел текучести $\sigma_t$ , МПа | Предел прочности $\sigma_b$ , МПа | Относительное удлинение, $\delta_5$ , % | Относительное сужение $\psi$ , % | Ударная вязкость $a_n$ , Дж/см <sup>2</sup> |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| Опытный         | 255-290                             | 932,6                             | 1048                              | 13,2                                    | 36,3                             | 110,2                                       |
| АНП-13          | 260-296                             | 960,8                             | 1086                              | 12,6                                    | 34,5                             | 112,4                                       |

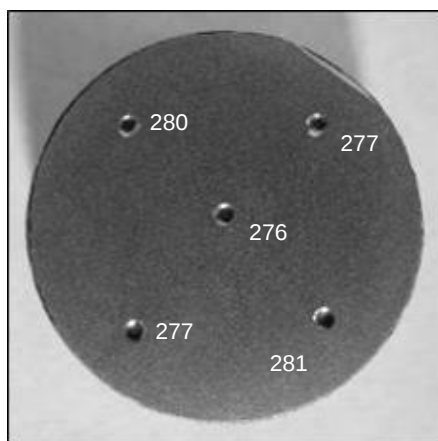


Рис. 7. Поперечное сечение образца с замерами твёрдости

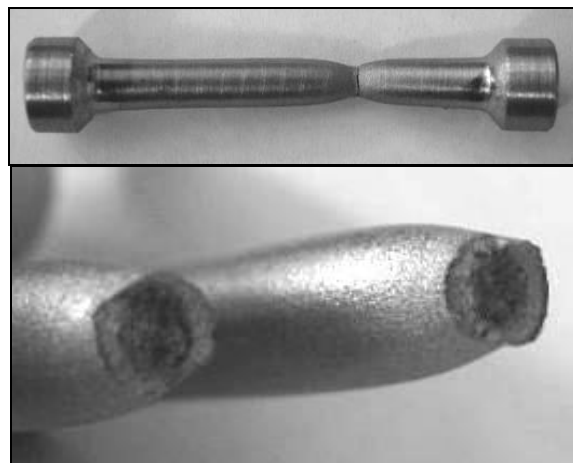


Рис. 8. Образец после испытания на растяжение

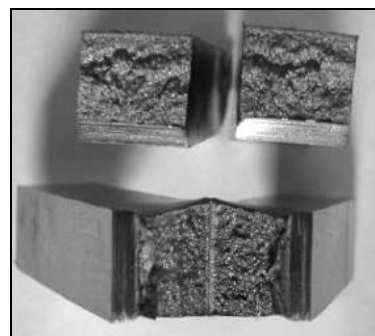
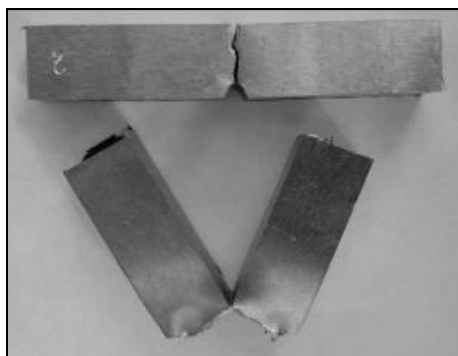


Рис. 9. Внешний вид образцов после испытания на ударный изгиб

**В пятой главе** разработана технология наплавки деталей железнодорожного транспорта опытными электродами и приведены результаты опытно-сравнительных испытаний созданными электродами.

Экспериментальные работы по наплавке изношенных поверхностей проводились на корпусах букс колесных пар тележек грузовых вагонов магистральных железных дорог, согласно «Инструкции по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов» ЦВ-201. Опытный электрод и электрод АНП-13 диаметром 4 мм перед наплавкой прокаливались в печи 2 часа при температуре 380 °С. Перед наплавкой, опорные поверхности «Б» и направляющие поверхности «А» (рис. 10) зачищались до металлического блеска. Наплавку опорных поверхностей «Б» производили в 2 слоя с припуском на механическую обработку 2 мм. Восстановление поверхностей «А» производили «крест - накрест», при этом производили проковку каждого слоя металла для релаксации внутренних напряжений сразу после завершения наплавки. После выполнения последнего прохода корпус буксы оставляли в нагруженном состоянии до полного охлаждения.

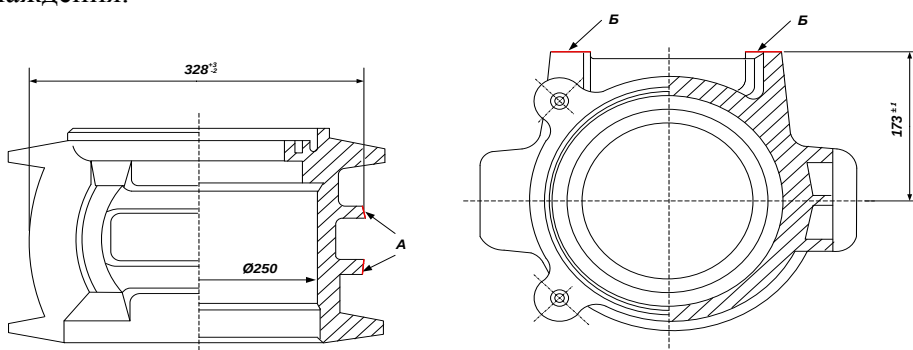


Рис. 10. Корпус буксы: А- направляющие поверхности, Б - опорная поверхность.

Контроль и оценка качества наплавленных поверхностей производились следующими методами: внешним осмотром - после наплавки и остывания и после механической обработки с использованием лупы х5; шаблоном для контроля расстояния между челюстями вдоль оси вагона (328,2°); шаблоном для контроля расстояния от оси буксы до опорной поверхности (173±1); электронным прибором для контроля размеров и формы внутренней части корпуса буксы модель БВ-7588.; замеры твердости обработанных поверхностей производили переносным твердомером ТЭМП-3. После проведенных испытаний наплавленные буксы установлены на грузовой вагон и направлены в эксплуатацию. На момент проведения последующих замеров пробег вагона составил 68000 км. Результаты измерений приведены в табл. 13.

Таблица 13 – Результаты опытно-сравнительных испытаний

| Номер буксы | Опорная поверхность, мм | Направляющие, мм | Твердость, НВ |
|-------------|-------------------------|------------------|---------------|
|-------------|-------------------------|------------------|---------------|

|                | До<br>наплавки | После<br>наплавки | После<br>испытаний | До<br>наплавки | После<br>наплавки | После<br>испытаний | До<br>испытаний | После<br>испытаний |
|----------------|----------------|-------------------|--------------------|----------------|-------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| <b>Опытный</b> |                |                   |                    |                |                   |                    |                 |                    |
| 1              | 166            | 176               | 172,6              | 322            | 326               | 323,5              | 268             | 274                |
| 2              | 165            | 175               | 173,2              | 317            | 327               | 323                | 264             | 274                |
| 3              | 166            | 176               | 172,5              | 316            | 326               | 323                | 267             | 275                |
| 4              | 164            | 175               | 173                | 323            | 326               | 323                | 266             | 273                |
| <b>АНП-13</b>  |                |                   |                    |                |                   |                    |                 |                    |
| 5              | 167            | 175               | 173,5              | 316            | 326               | 324                | 270             | 279                |
| 6              | 166            | 176               | 173,2              | 322            | 327               | 323                | 272             | 280                |
| 7              | 165            | 175               | 172,9              | 323            | 326               | 322                | 273             | 279                |
| 8              | 167            | 175               | 172,8              | 317            | 327               | 324                | 270             | 277                |

В результате опытно-сравнительных испытаний разработанные электроды показали хорошие сварочно-технологические свойства при наплавке – стабильное горение дуги, хорошее формирование валика, ровную и хорошо отделяющуюся шлаковую корку при низком разбрызгивании металла. Износ наплавленных поверхностей, практически, не отличается от износа поверхностей, наплавленных серийными электродами АНП-13.

Из приведенных данных следует, что средняя твердость восстановленных поверхностей корпусов букс наплавленных опытных электродов и АНП-13 составила 274 НВ и 279 НВ соответственно. Средний износ опорных поверхностей составил 2,67 мм и 2,34 мм, направляющих 3,13 мм и 3,0 мм. Таким образом, результаты эксплуатационной проверки показали высокую работоспособность деталей, восстановленных опытными электродами.

### **Основные результаты и выводы по работе**

1. Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность вовлечения компонентов минерального сырья Восточно-Сибирского региона в производство электродных покрытий. Разработан состав электрода типа Э-10Г2СХ для ручной дуговой наплавки с использованием покрытий на основе регионального сырья. Результаты исследований подтверждены актами опытно-сравнительных испытаний.

2. Впервые выполнено комплексное исследование потенциальных компонентов сварочных материалов на основе сырья из месторождений Восточно-Сибирского региона на перспективу их использования в качестве традиционных компонентов покрытий сварочных электродов.

3. Разработана термодинамическая модель плавления электрода, полученного на основе использования компонентов минерального сырья Восточно-Сибирского региона, доказана ее адекватность экспериментальным данным. Представленная модель позволяет существенно минимизировать затраты на корректировку традиционных и разработку новых сварочных покрытий. На основе результатов термодинамического моделирования теоретически обоснован выбор компонентов минерального сырья, пригодного для производства сварочных электродов.

4. Разработанный способ расчета состава компонентов плавления сварочных электродов, основанный на минимизации свободной энергии, позволяет эффективно без существенных затрат на экспериментальные исследования подбирать оптимальный качественный и количественный состав шихты. Показано, что термодинамическое моделирование сварочных процессов, протекающих в высокотемпературных интервалах, методом минимизации термодинамических потенциалов в отличие от других расчетных методов, основанных на константах равновесия химических реакций, позволяет определять направление протекания процессов в сварочной ванне, с высокой точностью оценивать равновесный состав гетерогенной системы газ – шлак – металл. Экспериментально доказана возможность использования мрамора, магнезита и

плавикового шпата рассматриваемых месторождений в составе покрытия сварочного электрода.

5. Опытным путем дана оценка сварочно-технологическим свойствам электродов с разработанным составом покрытия на основе минерального сырья Восточно-Сибирского региона. Показано, что твердость и износ поверхностей корпусов букс, наплавленных опытными электродами, соответствуют нормативно-технической документации по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов, а также требованиям, предъявляемым к электродам АНП-13.

**Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих работах:**

**Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Матафонов А.А., Бычинский В.А., Руш Е.А. Сварочные электроды из минерального сырья Восточной Сибири, полученные на основе результатов физико-химического моделирования//Вестник ИрГТУ, 2010.- №7(47).- С. 152-157.

2. Матафонов А.А., Бычинский В.А., Руш Е.А. Получение наплавочных электродов для восстановления узлов и деталей железнодорожного транспорта на основе минерального сырья Восточной Сибири// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2011.- №3 (31) – С. 238-243.

3. Матафонов А.А. Опытнo-сравнительные испытания сварочных электродов// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2011.- №4 (32).- С144-149.

**Статьи в сборниках трудов, другие публикации:**

4. Руш Е.А., Матафонов А.А. Возможные направления использования отходов обогащения слюды месторождений Восточной Сибири для различных технологических процессов предприятий железнодорожного транспорта// Технические, экономические и экологические проблемы транспорта: Материалы международной научно-практической конференции.- Брянск: РГОТУПС, 2008.- С. 62-67.

5. Матафонов А.А. Перспективные направления использования местного сырья и отходов Восточно-Сибирского региона для производства сварочных материалов//Интеллект - 2008: Сборник материалов Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.- Красноярск, 2008.- С. 122-124.

6. Руш Е.А., Матафонов А.А. Анализ возможностей использования минерального сырья Восточной Сибири для получения новых составов сварочных материалов// Безопасность регионов – основа устойчивого развития: Материалы второй международной научно-практической конференции.- Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2009.- Т. 2.- С. 255-258.

7. Матафонов А.А., Руш Е.А. Анализ сварочных материалов Восточно-Сибирской железной дороги, тенденции развития и поиск сырьевых компонентов// Современность в творчестве вузовской молодежи: Материалы 11 научно-практической конференции молодых ученых.- Иркутск: ФГОУ ВПО ВСИМВД РФ, 2009.- С. 180-184.

8. Матафонов А.А., Руш Е.А. Исследование процессов горения сварочного электрода АНП-13 с использованием минерального сырья Восточной Сибири методом физико-химического моделирования// Сборник материалов VII Конгресса обогатителей стран СНГ. – Москва: МИСИС, 2009.- (CD- носитель).