

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н.Ельцина»

На правах рукописи

**Вотинова Екатерина Борисовна**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДА ЭЛЕМЕНТОВ  
В НАПЛАВЛЕННЫЙ МЕТАЛЛ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ  
ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СОСТАВА ПОКРЫТИЙ СВАРОЧНЫХ  
ЭЛЕКТРОДОВ**

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Шалимов Михаил Петрович

Екатеринбург – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ .....	9
1.1 Физическое моделирование .....	9
1.2 Математическое моделирование .....	10
Выводы по главе 1 .....	42
ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФАЗ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ .....	43
2.1 Разработка физической модели процесса сварки покрытыми электродами .....	43
2.2 Разработка математической модели процесса сварки покрытыми электродами .....	49
2.3 Оценка адекватности математической модели .....	62
Выводы по главе 2 .....	64
ГЛАВА 3 РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕХОДА ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ .....	65
3.1 Разработка методики проведения экспериментов .....	65
3.2 Проведение экспериментов и представление их результатов .....	76
3.3 Применение математической модели для оценки коэффициентов перехода элементов .....	84
Выводы по главе 3 .....	97
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СОСТАВА ПОКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОДА .....	98
4.1 Разработка методики совершенствования состава покрытия сварочных электродов .....	99
4.2 Применение методики для совершенствования состава покрытия электродов .....	103

Выводы по главе 4 .....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное) Математическая модель формирования наплавленного металла при сварке порошковой проволокой .....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (справочное) Результаты химического анализа .....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ В (справочное) Акт передачи методики расчета .....	131

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** В настоящее время большая часть сварочных электродов выпускается, как правило, без надзора разработчиков. Для снижения себестоимости электродов предприятия-производители модернизируют состав шихты покрытий, часто в ущерб их качественным характеристикам. В тоже время, состав шихты покрытия сварочных электродов не всегда оптимизирован по количеству ферросплавов и других компонентов. Однако, именно состав шихты и параметры режима сварки определяют химический состав наплавленного металла, а значит и качественные характеристики сварного соединения.

На сегодняшний день состав металла шва (наплавленного металла) определяется на основе усредненных коэффициентов перехода, зависящих от конкретных условий сварки и не позволяющих прогнозировать состав и свойства металла при изменившихся условиях. Соответственно, их необходимо определять экспериментально для каждого способа сварки и элемента отдельно. Это требует больших материальных и временных затрат.

Прогнозирование химического состава шва открывает возможность совершенствования процесса сварки еще на стадии проектирования путем подбора необходимых сварочных материалов и параметров режима, которые обеспечат необходимые эксплуатационные характеристики металла. В связи с этим разработка методов прогнозирования физико-химических процессов при ручной дуговой сварке покрытыми электродами на основе метода полного материального баланса и создание методики, позволяющей оптимизировать состава покрытий сварочных электродов, является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** До сих пор были исследованы процессы перехода отдельных элементов на основании сравнения исходного состава и состава металла шва. Однако на сегодняшний день нет целостной системы, есть только отдельные данные «было - стало». При ручной дуговой сварке покрытыми электродами формируются капли металла и шлака, определяющие состав наплавленного металла и сварочно-технологические

свойства материалов: формирование поверхности шва, отделимость шлаковой корки, возможность сварки в различных пространственных положениях и др. Капли формируются при плавлении стержня и покрытия электрода и взаимодействии образовавшихся фаз друг с другом и газом. Процессы взаимодействия фаз, протекающие на различных стадиях нагрева и плавления электрода, определяют их конечный состав.

По указанной тематике можно отметить научные работы известных исследователей И.К. Походни, В.В. Подгаецкого, А.А. Ерохина, Г.Л. Петрова, А.А. Буки, Н.Н.Потапова, В.Н. Бороненкова, G. Glaussen и др.

Однако, имеющиеся в литературе модели и методы прогнозирования состава металла шва при ручной дуговой сварке либо используют данные и соотношения, которые недостаточно достоверны и трудноопределимы (площадь контакта металл-шлак, температура капель, время и скорость взаимодействия фаз), либо дают полуколичественные результаты.

В связи с этим планируется оценить результаты процессов, протекающих в твердой фазе, капле и металлической ванне, определить усредненные и парциальные коэффициенты перехода элементов и выявить их взаимосвязь с параметрами режима и характеристиками сварочных электродов.

**Цель работы:** разработать методику расчета и совершенствования состава покрытия сварочных электродов на основе моделирования процессов в системе металл-шлак-газ.

Для реализации поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. На основе анализа литературных данных по методикам прогнозирования состава фаз при ручной дуговой сварке покрытыми электродами разработать физическую и математическую модели процессов взаимодействия с использованием метода полного материального баланса.

2. Разработать методику проведения экспериментов по исследованию влияния параметров режима на процессы взаимодействия при ручной дуговой сварке покрытыми электродами, учитывающую испарение и разбрызгивание, и провести эксперименты с электродами разных марок.

3. Осуществить обработку экспериментальных данных для определения усредненного и парциальных коэффициентов перехода элементов в наплавленный металл и металл шва и их зависимостей от параметров режима сварки.

4. Оценить адекватность разработанных моделей и полученных экспериментальных и расчетных результатов.

5. Разработать методику расчета состава покрытий сварочных электродов.

#### **Научная новизна работы:**

- разработаны физическая и математическая модели процессов взаимодействия фаз на основе применения метода полного материального баланса при ручной дуговой сварке покрытыми электродами;

- впервые определены коэффициенты перехода углерода, марганца, кремния и титана из металлической и шлаковой фаз в наплавленный металл и металл шва при ручной дуговой сварке покрытыми электродами и их зависимости от параметров режима;

- впервые определены зависимости потерь металла и шлака от параметров режима при ручной дуговой сварке покрытыми электродами.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

- разработана экспериментально-теоретическая методика определения усредненных и парциальных коэффициентов перехода элементов при ручной дуговой сварке покрытыми электродами;

- получены зависимости доли участия основного металла, массы металлической и шлаковой ванн от параметров режима сварки и характеристик сварочных электродов для низкоуглеродистых низколегированных сталей;

- на основании полученных в работе закономерностей перехода элементов в наплавленный металл при ручной дуговой сварке предложена методика расчета и совершенствования состава шихты покрытий сварочных электродов.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Для достижения поставленной цели было использовано сочетание теоретических, экспериментальных и вычислительных методов исследований.

Для проведения экспериментов была скомпонована установка, состоящая из

стола с токоподводом, механизма перемещения горелки Noboruder NB-2SV и источника питания Шторм Lorch X350. Параметры режима сварки фиксировали с помощью измерительного блока БИ-01 (Selma).

Площадь сечения сварного шва определяли измерением макрошлифов наплавленных образцов с помощью программы «Компас-3DV12».

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с помощью методов математической статистики.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- разработанные на основе метода полного материального баланса физическая и математическая модели ручной дуговой сварки покрытыми электродами;

- расчетно-экспериментальная методика определения усредненных и парциальных коэффициентов перехода элементов в наплавленный металл и металл шва при ручной дуговой сварки покрытыми электродами;

- значения показателей, определяющих формирование состава наплавленного металла и металла шва при ручной дуговой сварки покрытыми электродами низкоуглеродистых и низколегированных сталей, и их зависимости от параметров режима и характеристик электродов;

- методика расчета и совершенствования состава шихты покрытия сварочных электродов.

**Степень достоверности** полученных результатов подтверждается применением современных методов исследований и большим объемом экспериментального материала, обработанным с использованием методов математической статистики. Положения и выводы по работе не противоречат известным научным представлениям и результатам.

### **Апробация работы:**

Основные результаты работы доложены и обсуждены на V международной конференции по математическому моделированию и компьютерному анализу материалов и технологий (г. Ариэль, Израиль, 2008 г.), Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и

техники (Екатеринбург, 2009 г.), на научно-технических конференциях «Сварка и диагностика» в рамках IX Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2009 г.), «Сварка и диагностика» в рамках X Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2010 г.), «Сварка и диагностика» в рамках XI Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2011 г.), на Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Инженерная мысль машиностроения будущего» (Екатеринбург, 2012 г.), Техноген-2012 (Екатеринбург, 2012 г.), «Сварка и диагностика» в рамках XII Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2012 г.), «Сварка и диагностика» в рамках XIV Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика» (Екатеринбург, 2014 г.), XXV научно-техническая конференция сварщиков Урала и Сибири «Современные проблемы сварочного производства» (Челябинск, 2014 г.), «Актуальные проблемы современной науки и техники» (Пермь, 2015 г.), III международная электронная научно-техническая конференция «Компьютерные технологии в соединении материалов-2015» (Тула, 2015 г.), «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2015 г.), «Материаловедение. Машиностроение. Энергетика» в рамках международного молодежного научно-промышленного форума «Прорыв» в рамках промышленной выставки «Иннопром-2015» (Екатеринбург, 2015 г.).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках г/б тем № Н.979.42Б.001/12 «Исследование и компьютерное моделирование процессов нагрева, плавления и взаимодействия материалов для создания научных основ прогнозирования высокотемпературных процессов при сварке, наплавке и нанесении покрытий» и № Н979.42Б.002/14 «Исследование физических и химических процессов в зоне сварки для создания научных основ оптимизации технологий и разработки материалов».



## ГЛАВА 1 МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ

Современные тенденции развития науки и техники характеризуются разработкой, внедрением и широким использованием различных моделей, создаваемых как на базе традиционного экспериментального подхода, так и с применением новейших информационных технологий [1].

Одним из основных этапов разработки технологии сварки является расчет состава металла шва или наплавленного металла. На сегодняшний день применяются такие подходы к оценке состава металла шва, как расчет по смешению, расчет с учетом коэффициентов перехода, регрессионные уравнения, расчеты по термодинамическим или кинетическим моделям [2-5].

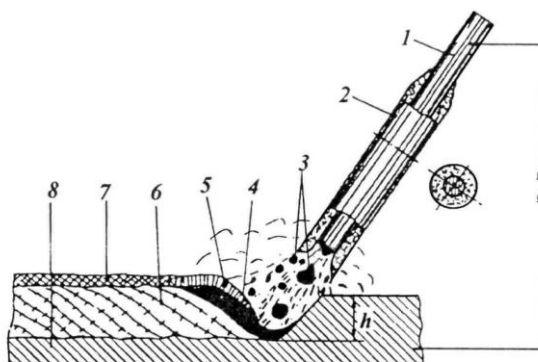
### 1.1 Физическое моделирование

Физическая модель – установка, устройство или приспособление, воспроизводящее в том или ином масштабе натуральный объект при сохранении физического (динамического) подобия процессов в модели и натуре. При физическом моделировании реальному объекту ставится в соответствие его увеличенный или уменьшенный материальный аналог, допускающий исследование, как правило, в лабораторных условиях, и последующее перенесение свойств изучаемых процессов и явлений с модели на объект на основе теории подобия [1].

Процесс сварки является достаточно сложным для изучения. Такие факторы, как высокая температура металла, скорость протекания реакций взаимодействия процесса сварки, зависимость конечного результата (состав, свойства металла шва и его качество) от многих внешних и внутренних факторов, затрудняют изучение данного процесса непосредственно на объекте.

В литературе приводится достаточное количество описаний [6, 7, 8] процесса сварки покрытым электродом.

Как правило, оно представляет собой схематичное или упрощенное изображение зоны сварки. Одна из наиболее часто встречающихся моделей приведена в работе [9] (рис.1.1).



1 – стержень электрода; 2 – покрытие электрода; 3 – капли металла, капли, покрытые шлаком, капли шлака; 4 – металлическая ванна; 5 – шлаковая ванна; 6 – металла шва; 7 – шлаковая корочка; 8 – основной металл

Рисунок 1.1 - Схема ручной дуговой сварки плавящимся металлическим электродом с покрытием

У всех моделей можно выявить следующие общие черты:

- выделение процессов, происходящих при нагреве электрода до его плавления;
- выделение стадий капли и ванны.

Однако подобные физические модели [6-9] не могут быть использованы в данной работе, так как сильно упрощены в плане описания протекающих физико-химических процессов.

Поэтому представляется целесообразным разработать модель процесса, отражающую все стадии процесса взаимодействия и учитывающую наиболее важные механизмы формирования металла шва.

## 1.2 Математическое моделирование

С методологической точки зрения можно выделить два основных подхода к математическому моделированию сложных систем: метод «черного ящика» [1,

10] и аналитический метод [1, 11-12].

Метод «черного ящика» применяется в том случае, когда внутреннее строение системы неизвестно или не интересует исследователя. В этом случае состояние объекта характеризуется входными, выходными параметрами и возмущающими воздействиями. Математическая модель строится путем установления соотношения между входными и выходными параметрами и реакцией объекта на внешние воздействия. При этом широко применяются методы планирования экспериментов, дисперсионного, регрессионного и корреляционного анализов. К основным достоинствам метода «черного ящика» можно отнести его простоту, разработанность математического аппарата, гарантированность результата моделирования. Недостатки его связаны в основном с малой информативностью получаемых моделей и невозможностью оценки истинных причин явлений, протекающих в изучаемой системе [1].

При аналитическом подходе модель строится на основе изучения внутренней структуры явлений, протекающих в системе. В этом случае входные и выходные параметры модели связываются друг с другом путем применения фундаментальных физических, физико-химических и других закономерностей, учитывающих внутреннюю структуру объекта моделирования. Получаемое математическое описание процесса имеет высокую информативность, широкую область применения, универсальность. Применение таких моделей позволяет понять ход протекания процессов, легко стыкуется с процедурами оптимизации. Аналитический подход значительно сокращает объем экспериментов, повышает эффективность моделирования [1].

К моделям, разработанным для описания процесса ручной дуговой сварки покрытыми электродами, использующим метод «черного ящика», можно отнести модели на основе расчета металла шва по смешению, с учетом коэффициентов перехода, регрессионных уравнений. Аналитический метод применяют в моделях, основанных на термодинамическом и кинетическом анализе.

### 1.2.1 Расчет состава металла шва по смешению

Наиболее простым вариантом оценки состава наплавленного металла и металла шва является расчет по смешению (1.1) [9].

$$[\text{Э}_i]_{\text{шов}} = [\text{Э}_i]_{\text{осн}} \cdot \gamma_{\text{осн}} + [\text{Э}_i]_{\text{прис.}} \cdot (1 - \gamma_{\text{осн}}), \quad (1.1)$$

где  $[\text{Э}_i]_{\text{шов}}$  - содержание элемента в металле сварного шва (в наплавленном металле), мас. %;

$[\text{Э}_i]_{\text{осн}}$  - содержание элемента в основном металле, мас. %;

$\gamma_{\text{осн}}$  - доля участия основного металла в металле сварного шва (в наплавленном металле);

$[\text{Э}_i]_{\text{прис.}}$  - содержание элемента в присадочном металле (в типичном наплавленном металле для покрытых электродов), мас. %;

В данном случае требуется знание состава основного металла, типичного состава наплавленного металла данными электродами и доли участия основного металла. Типичные составы основного и наплавленного металла можно найти в нормативной документации, а долю участия оценить ориентировочно. Это, в частности, связано с тем, что доля участия, принятая в расчете, может не совпадать с действительной (например, в связи с изменением параметров режима). Таким образом, данный метод дает приблизительный результат, но очень удобен для предварительной оценки. Его можно использовать для решения как прямой (расчет состава металла шва), так и обратной задачи (расчет состава сварочных материалов).

### 1.2.2 Расчет состава металла шва с помощью регрессионных уравнений

В ряде работ [2, 13] были получены регрессионные уравнения, описывающие зависимость состава металла шва от отдельных параметров режима сварки.

В работе [2] составлены регрессионные уравнения (1.2, 1.3), описывающие зависимость содержания марганца и кремния в металле шва от основности шлака, содержания оксидов железа и кремния.

$$[Mn] = 0,32635 - 0,07215 \cdot (FeO) + 2,1779 \cdot B + 0,00213 \cdot (FeO)^2 - 0,715 \cdot B^2 - 0,006857 \cdot (SiO_2) \cdot B + 0,03393 \cdot (FeO) \cdot B \quad (1.2)$$

$$[Si] = 0,2477 + 0,01135 \cdot (SiO_2) - 0,03262 \cdot (FeO) - 0,1699 \cdot B + 0,000966 \cdot (FeO)^2 - 0,000384 \cdot (SiO_2) \cdot (FeO) - 0,0043 \cdot (SiO_2) \quad (1.3)$$

где  $[Mn]$ ,  $[Si]$  – содержание соответственно марганца и кремния в металле шва, мас.%;

$(FeO)$ ,  $(SiO_2)$  – содержание соответственно оксида железа и кремния в покрытии электродов, мас.%;

$B$  – основность покрытия электродов, определяемая по уравнению (1.4).

$$B = \frac{CaO + MgO + FeO + MnO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + 0,788 \cdot TiO_2} \quad (1.4)$$

Однако, на мой взгляд, вполне очевидно, что увеличение количества оксида железа в покрытии приведет к снижению содержания марганца и кремния в металле шва за счет процессов раскисления. Повышенное содержание оксидов кремния в покрытии приведет к снижению количества марганца в металле шва и увеличению содержания кремния (марганец участвует в восстановлении кремния из его оксидов). Увеличение основности шлака ведет к повышению содержания марганца и уменьшению содержания кремния в металле шва. Приведенные регрессионные уравнения лишь подтверждают это. Надо отметить, что в приведенных уравнениях отсутствуют в явном виде любые технологические параметры (параметры режима), между тем известно, что от температуры нагрева электрода зависит интенсивность протекания химических реакций. Кроме того, нет учета вязкости шлака, которая будет меняться при увеличении основности.

В работе [13] предлагается методика, требующая 4-5 экспериментальных проверок при разработке каждого электродного покрытия с требованием получения заданного состава металла шва, что приводит к увеличению затрат и не гарантирует воспроизводимости результатов.

Таким образом, можно сделать вывод, что регрессионные уравнения выражают зависимость некоторых величин от одного-двух параметров. Но этого недостаточно для построения полноценной математической модели плавления электрода и процесса ручной дуговой сварки в целом. Модели, основанные на обработке экспериментальных данных, не обладают главными, на мой взгляд, условиями для применения – универсальностью и точностью.

### **1.2.3 Расчет состава металла шва с учетом коэффициентов перехода**

Одним из самых распространенных методов оценки состава металла шва или наплавленного металла является расчет с учетом коэффициентов перехода. Для его осуществления необходимы те же данные, что и для расчета состава по смешению с той лишь разницей, что полученное содержание элемента в шве (наплавленном металле) по смешению корректируется на коэффициент перехода элемента.

Под коэффициентом перехода понимают долю массы элемента, перешедшую в металл шва (наплавленный металл) во время сварки (наплавки).

Коэффициент перехода элемента зависит от его начального количества в сварочных материалах, а также от реакций, протекающих на всех стадиях процесса сварки. В зависимости от характера процессов и физико-химических условий целесообразно выделить следующие стадии (группы процессов):

- стадия нагрева электрода характеризуется процессами, протекающими в твердой фазе: изменение температуры и связанное с этим взаимодействие веществ;

- стадия плавления электрода: процессы, протекающие в жидкой фазе – плавление, разбрызгивание, химическое взаимодействие;

- стадия формирования шва, сопровождающаяся процессами, протекающими в твердо-жидкой фазе (смешение металлов, их взаимодействие и кристаллизация).

Каждая из этих стадий достаточно подробно описана в литературе [3, 10, 14-58].

В работе [14] математические модели в виде полиномов первой степени составлены по результатам статистической обработки данных по химическому составу сварочного и наплавленного металлов для 40 проволок различных марок для сварки в защитных газах углеродистых сталей. Проведенные расчеты дают значения условных коэффициентов перехода элементов из сварочной проволоки в наплавленный металл  $\eta_i$ . При этом режимы, при которых производилась сварка, не были зафиксированы.

Модели, в которых за основу приняты статистически обработанные экспериментальные данные также не решают проблему расчетного определения коэффициентов перехода [10, 15].

В работе [10] проведены эксперименты по оценке коэффициентов перехода для молибдена, вольфрама и ванадия (1.5).

$$\eta_{\text{Э}_i} = \frac{[\text{Э}_i]_{\text{шов}} (1 + P \cdot K_{\text{МП}}) \cdot (1 - \Psi)}{([\text{Э}_i]_{\text{ст}} + K_{\text{МП}} \cdot [\text{Э}_i]_{\text{ш}}) \cdot (1 - \Psi_1)} \quad (1.5)$$

где  $\eta_{\text{Э}_i}$  – коэффициент перехода элемента;

$[\text{Э}_i]_{\text{шов}}$ ,  $[\text{Э}_i]_{\text{ст}}$ ,  $[\text{Э}_i]_{\text{ш}}$  - содержание элемента в шве, стержне и шихте покрытия, мас. %;

$K_{\text{МП}}$  – коэффициент массы покрытия;

$P$  – количество металлических составляющих в покрытии, мас. %;

$\Psi$  – общие потери металла при сварке;

$\Psi_1$  – потери на испарение и разбрызгивание.

При этом авторы [10] пренебрегают потерями металла на окисление. Если для молибдена и вольфрама данное предположение может быть верно, то ванадий окисляется относительно активно. Для других элементов, которые переходят в металл шва или наплавленный металл из покрытия, данный метод применен быть не может.

Применение статистической модели неравновесных процессов при сварке [15] позволило оценить только параметры перехода хрома при его содержаниях в

покрытии от 10 до 31 мас. %. Данный метод может быть применен для оценки перехода одного элемента при ручной дуговой сварке покрытыми электродами. При этом практически отсутствует влияние на коэффициент перехода технологических параметров и концентрации других элементов в покрытии [15].

### ***1.2.3.1 Процессы, протекающие в твердой фазе***

Электродные покрытия представляют собой спрессованную смесь мелкоизмельченных материалов с различными физическими и химическими свойствами, скрепленных жидким стеклом. Нагрев и плавление таких смесей сопровождается взаимодействием между компонентами.

Ряд химических соединений, входящих в состав покрытия сварочных электродов становятся неустойчивыми при температурах, не приводящих к плавлению покрытия и стержня сварочных электродов. Распад большинства органических и минеральных компонентов происходит до 1200 °С. Именно поэтому очень важно рассмотреть не только процесс плавления электрода, но и процесс его нагрева. Процессы, протекающие при нагреве электрода – это диссоциация карбонатов, оксидов, фторидов, деструкция органических соединений, взаимодействие между компонентами, испарение влаги и др. [3, 7].

Наиболее легкоплавким компонентом большинства покрытий и керамических флюсов является силикат натрия (сухой остаток жидкого стекла), который уже в твердой фазе взаимодействует с другими компонентами покрытия, образуя соединения с более высокой температурой плавления. Об этом свидетельствует тот факт, что дозировка жидкого стекла в широких пределах не сказывается на тугоплавкости покрытия [5].

Диссоциация веществ. В качестве газообразующих компонентов электродных покрытий и шихты порошковой проволоки используются органические соединения (крахмал, целлюлоза  $C_6H_{10}O_5$ ) или природные минералы (магнезит  $MgCO_3$ , мрамор  $CaCO_3$ , доломит  $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ).

И те и другие компоненты диссоциируют при температурах значительно более низких, чем температура плавления электродного покрытия.



Исследование диссоциации крахмала, целлюлозы и карбонатов показало, что наличие примесей в виде оксидов, фторидов и металлических порошков либо не приводит к существенному смещению температурного интервала диссоциации, либо ведет к снижению температуры начала этого процесса.

При любых условиях процессы диссоциации заканчиваются до начала плавления покрытия, а подбором компонентов смеси в различных пропорциях можно регулировать газообразование как по температуре его начала, так и по величине температурного диапазона с учетом скоростей нагрева [16].

Окислительные процессы. Окислительные процессы, протекающие при дуговой сварке покрытыми электродами, играют существенную роль при формировании составов наплавленного металла (металла шва) и шлака.

По мнению авторов работ [17 - 21], основным источником окисления металла при сварке являются компоненты покрытий и флюсов, а кислород воздуха играет меньшую роль.

В реальных условиях сварки нагрев материалов покрытия протекает в контакте с атмосферой воздуха. Рассматривая роль кислорода воздуха в окислении элементов, переходящих в сварочную ванну из проволоки и из покрытия, были замечены следующие закономерности [5]:

- чем толще покрытие (больше коэффициент массы покрытия  $K_{мп}$ ), тем участие кислорода воздуха в окислении элементов в зоне сварки меньше;

- экспериментально показано, что потери элементов из проволоки за счет окисления воздухом невелики у покрытий с большой окислительной способностью, но ощутимы у безокислительных покрытий. Эти потери составят примерно 20-30 % для марганца и кремния и, возможно, несколько больше для углерода.

Оценка окислительной способности покрытия рассматривается в работах [5, 8, 17, 18].

В работе [5] показано, что наибольшей окислительной способностью обладают покрытия из гематита, мрамора или из мрамора с добавками плавикового шпата, но окислительное действие мрамора при одинаковой толщине

покрытия меньше, чем гематита. Степень окисления примесей электродной проволоки увеличивается с толщиной покрытия и коэффициентом массы покрытия  $K_{мп}$ .

Для удобства сравнения окислительного действия компонентов в табл. 1.1 приведены средние значения потерь при одинаковом  $K_{мп} = 0,3$ . Там же приведены потери элементов при сварке на воздухе и в  $CO_2$ .

Таблица 1.1 - Средние значения потерь элементов при сварке на воздухе и в  $CO_2$

Условия сварки	Потери (1- $\eta_i$ )			
	C	Mn	Si	Cr
На воздухе без защиты	0,7	0,33	0,2	0,08
В $CO_2$	0,4	0,31	0,29	0,08
С покрытием из гематита	0,78	0,95	0,98	0,75
С покрытием из мрамора	0,72	0,86	0,90	0,57
С покрытием из плавикового шпата	0,33	0,62	0,12	0,11
С покрытием из синтетического шлака CaO-BaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (80%) и плавикового шпата (20%)	0,43	0,30	0,12	0,05
С покрытием из кварцевого песка	0,8	0,82	0,25	0,2

Анализ данных табл. 1.1 позволяет сделать вывод, что гематит и мрамор, нанесенные на электродный стержень, являются более мощными окислителями, чем воздух и  $CO_2$ . Окислительное же действие последних практически одинаково [17-21].

Реакции восстановления. На данной стадии процесса реакции восстановления не происходят.

В покрытии при нагреве могут идти и другие процессы, например, взаимодействие фтористого кальция с силикатами (кварцевым песком, жидким стеклом и т.п.) с образованием  $SiF_4$  [4, 22] или  $NaF$  [17], что увеличивает выделение газообразных продуктов в зоне сварки.

### 1.2.3.2 Процессы, протекающие в жидкой фазе

Продолжительное воздействие источников нагрева на электрод приводит к его расплавлению. Плавление электрода происходит неравномерно. Стержень обладает большей теплопроводностью, поэтому его плавление происходит

быстрее. Плавление покрытия происходит медленнее, что является причиной образования так называемой втулки (рис.1). В зависимости от равномерности толщины покрытия она может быть правильной цилиндрической формы или со скошенным краем [7, 9].

Плавление покрытия (при установившемся режиме процесса плавления) начинается с внутренней стороны втулки. Расплавленный шлак растекается по поверхности металлической капли, образованной металлом стержня, и взаимодействует с ней. Однако некоторая часть покрытия (шлака), как показывает наблюдение, непосредственно стекает в ванну в виде отдельных капель или же сплошным потоком [7, 9].

Таким образом, с металлом капли контактирует шлак, образованный из слоя покрытия определенной толщины. При более толстом покрытии наружная его часть может переходить в ванну, не контактируя с металлом капли и, следовательно, не взаимодействуя с ним [7, 9].

С появлением жидкой фазы по мере увеличения ее объема уменьшается внутреннее трение и стекание покрытия с электрода начинается еще до полного расплавления всех составных частей покрытия. Но и в расплавленном шлаке можно ожидать заметной гетерогенности, например, наличия нерасплавившихся частиц извести и др. [5, 23, 24].

Испарение. Процессы дуговой сварки плавлением, в том числе ручной сварки покрытыми электродами, сопровождаются высокотемпературным нагревом и испарением некоторой части основного и электродного материала [3].

Интенсивность испарения металлического и шлакового расплавов, образующихся при плавлении электрода и основного металла, зависит от режимов сварки, техники сварки, пространственного положения и составов электродного покрытия, основного и присадочного металлов [3].

Испарение электродного и основного материалов при сварке, в результате которого образуется сварочный аэрозоль, в значительной мере зависит от температурных условий в зоне дугового разряда. Последние зависят от режимов сварки: сварочного тока, полярности и напряжения. Отечественными и

зарубежными исследователями [5, 25, 26] установлено, что независимо от типа применяемых электродов увеличение сварочного тока приводит к повышению температуры каплей металла на торце электрода и, соответственно, интенсификации процессов испарения.

Необходимо отметить, что электрод меньшего диаметра выделяет больше твердой составляющей сварочного аэрозоля (ТССА), чем электрод большего диаметра, если сварка выполняется на токе одинаковой величины. Причиной большей интенсивности испарения расплава электродом меньшего диаметра является более высокая температура нагрева каплей на электроде [5].

Установлено, что большое влияние на испарение оказывает напряжение дуги [21, 25 - 28]. Его увеличение вследствие удлинения дуги вызывает существенное увеличение испарения.

Сведения о влиянии рода тока и полярности на величину испарения противоречивы. В большинстве работ отмечается, что при прочих равных условиях наибольшая интенсивность испарения наблюдается при сварке постоянным током обратной полярности [8, 25]. Этот факт хорошо согласуется с экспериментальными данными о более высокой температуре каплей на торце электрода при сварке на обратной полярности. Однако в некоторых работах [27] отмечается, что при сварке высокопроизводительными электродами с рутиловым и кислым покрытиями наибольшая интенсивность испарения имеет место при сварке на прямой полярности. При сварке переменным током интенсивность испарения как правило, ниже, чем при сварке постоянным током. Такую зависимость можно объяснить периодическим снижением сварочного тока до нулевого значения (в отличие от постоянного тока), что влечет за собой соответствующие температурные изменения нагрева металла на торце электрода и интенсивности испарения плавящегося электродного материала [20].

Из показателей, характеризующих режим сварки, только скорость сварки не оказывает заметного влияния на величину испарения. В литературе встречаются сведения о влиянии на величину испарения характера разделки свариваемых

кромки, вида сварных соединений и их расположения в пространстве, техники сварки [8, 25, 28].

Характер испарения зависит от состава многокомпонентной испаряющейся смеси, а ее состав определяется составом (типом) покрытия.

По данным [3, 29], наибольшие выделения аэрозоля характерны для электродов с целлюлозным покрытием. За ними следуют низководородные электроды с покрытием основного вида. Электроды с кислыми, рутиловыми и ильменитовыми покрытиями по показателям валовых выделений ТССА между собой различаются незначительно, а по сравнению с электродами с целлюлозным и основным покрытиями характеризуются заметно меньшим выделением аэрозоля.

При сварке, как правило, расплавляются не чистые металлы, а сплавы сложного состава. В этих случаях пар представляет собой смесь паров компонентов сплава, причем элементы с меньшей температурой испарения будут составлять относительно большую часть паров. Избирательность является важнейшей особенностью испарения многокомпонентных систем. Например, из железо-марганцевых расплавов испаряется при нагреве прежде всего марганец [30, 31], причем этот процесс развивается тем интенсивнее, чем выше содержание марганца в расплаве [3, 32].

При сварке плавящимся электродом металл и шлаковая фаза проходят последовательно стадии капли и ванны. Для стадии капли характерны высокая удельная поверхность, на порядок превышающая удельную поверхность сварочной ванны [5], и более высокий уровень перегрева. Поэтому можно полагать, что здесь условия испарения более благоприятны, чем на стадии ванны [3, 33].

По результатам проведенных экспериментов [3, 29, 34] сделан вывод, что часть элементов в большей степени испаряются с поверхности шлакового расплава (*Mn, Si, F*, соединения щелочных и щелочно-земельных металлов), а часть – с поверхности расплавленного металла (*Fe, Cr*). Повышение основности шлака ведет к увеличению интенсивности испарения элементов.

Интересно, что максимум выделения паров не связан с характером переноса капель электродного металла [3].

Показано, что газовая атмосфера дуги значительно влияет на интенсивность испарения. Можно заметить, что испарение усиливается с увеличением теплопроводности газа и его окислительной способности [35].

Установлено, что при сварке покрытыми электродами испаряется 1-3 % электродного материала [8].

Количество испаряемого электродного металла не идентично его потерям на испарение. Подавляющая часть металла испаряется в районе активного пятна дуги на электроде, откуда поток газов и паров направлен преимущественно в сторону ванны, где пары в основном и конденсируются. Лишь небольшая часть их теряется вследствие местных завихрений и случайных отклонений потока. Количество же металла, испаряемого с боковой поверхности капли, в сравнении с основным потоком невелико.

При ручной дуговой сварке потери электродного металла на испарение можно принять  $\leq 0,5$  % [27], хотя в большинстве случаев определялось совместно испарение и окисление (без их дифференциации) [21, 36].

Разбрызгивание металла при сварке является неотъемлемой частью самого процесса сварки. В зависимости от степени защиты зоны сварки величина этих потерь может составлять от 0 (при дуговой сварке под флюсом) до 15 % (при сварке голой проволокой). Таким образом, величина потерь на разбрызгивание металла определяется механизмом перехода металла в сварочную ванну.

В связи с этим появляется необходимость определить либо абсолютную величину потерь на разбрызгивание, либо установить зависимость потерь на разбрызгивание от каких-либо параметров режима при дуговой сварке покрытыми электродами.

В работе [5] установлены три процесса, результатом которых является разбрызгивание:

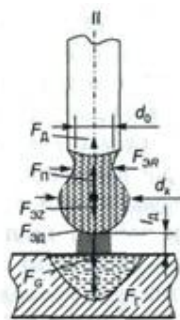
- взрывообразный локальный выброс частиц металла (обычно небольших) из капель на электроде и из ванны вследствие интенсивного местного

газовыделения в объеме металла. Этот вид разбрызгивания связан с металлургическими особенностями процесса;

- выброс целых капель наблюдается, когда результирующая сила (рис.1.2), отрывающая каплю от электрода, направлена в сторону от его оси за пределы ванны. Этот вид разбрызгивания возникает при нестабильном горении дуги [37];

- разрыв жидкого мостика, соединяющего электрод и ванну при коротком замыкании. Этот механизм разбрызгивания в большой степени зависит от динамических характеристик источника тока [38].

В работах [39 - 43] исследована зависимость разбрызгивания от силы сварочного тока для электродов УОНИ 13/45, УОНИ 13/55 и МР-3 диаметром 3 мм. Практически для всех марок электродов увеличение тока с 80 А до 140 А приводит к возрастанию разбрызгивания с 2 до 5 %.



сила тяжести  $F_{г}$ ; сила поверхностного натяжения  $F_{пн}$ , электродинамическая сила  $F_{эд}$ , реактивное давление  $F_{р}$ , испаряющегося с поверхности капли металла и выделения газа, сила давления  $F_{п}$  потоков плазмы и бомбардировки заряженными частицами; сила взрыва перемычки между каплями и электродом  $F_{вз}$

Рисунок 1.2 – Силы, действующие на каплю [37]

Увеличение коэффициента массы покрытия  $K_{мп}$ , с одной стороны, позволяет улучшить защиту наплавленного металла от окружающей среды, снизить чувствительность к удлинению дуги и эксцентриситету покрытия, и, как следствие, уменьшить потери металла на разбрызгивание. С другой стороны, утолщение покрытия (увеличение коэффициента массы покрытия) сопровождается увеличением глубины втулочки из нерасплавившегося покрытия. Это во-первых, способствует повышению температуры торца электрода, а во-

вторых, приводит к удлинению дуги, увеличению напряжения и как следствие этого – к увеличению разбрызгивания [3].

Установлено, что роль разбрызгивания металла из ванны в общем балансе разбрызгивания невелика. Это позволяет все найденные из опыта потери на разбрызгивание относить к электродному металлу, пренебрегая потерями основного металла [38].

В работах [5, 43] показано, что потери на разбрызгивание в большинстве случаев составляют больше половины всех потерь.

Взаимодействие газов с жидким металлом наиболее подробно рассмотрено в работе [44].

Основными особенностями, определяющими взаимодействие газов с жидким металлом при дуговой сварке, являются высокая, но неодинаковая температура газа и металла, большая контактная поверхность между ними, кратковременность пребывания металла в жидком состоянии, наличие магнитных и электрических полей и др. [44].

Наибольшую растворимость в металле из газообразных компонентов, находящихся в зоне сварки, имеет кислород. Далее (в порядке уменьшения активности) идут водород и азот [44].

Окисление при дуговой сварке принято оценивать по отклонению содержания легирующих элементов в наплавленном металле или металле шва от их концентраций, рассчитанных по смешению.

Количественно процесс окисления может быть определен величиной коэффициента перехода (1.6) или коэффициента усвоения элемента из проволоки или основного металла [45-48]

$$\eta_{\text{Э}_i} = \frac{[\text{Э}_i]_{\text{шов}}}{\sum [\text{Э}_i]_n} \quad (1.6)$$

где  $\sum [\text{Э}_i]_n$  - суммарное содержание элемента в стержне, ферросплавах и основном металле, мас. %.

В работах [44, 49] коэффициенты усвоения элементов из электродной проволоки и основного металла были определены отдельно, а окислительная



способность защитного газа оценивалась количественно по суммарному кислороду, прореагировавшему с легирующими элементами металла. При дуговой сварке окисление элементов, содержащихся в электродной проволоке, протекает более интенсивно, чем тех же элементов, содержащихся в основном металле.

Переход металлических частиц из шлака в каплю на электроде зависит и от вязкости шлака. При высокохромистых покрытиях, дающих густые, вязкие шлаки, переход хрома и марганца в каплю тормозится и в условиях опыта успевает пройти немногим более, чем на половину [46].

Эксперименты, проведенные рядом исследователей, показали [50 - 53], что увеличив концентрацию раскислителя в покрытии, можно снизить окислительный потенциал шлака, что приведет к повышению коэффициентов перехода, которое, однако, будет не беспредельным, так как скорость взаимодействия со шлаком диспергированных в нем частиц присадки уменьшается с уменьшением окислительного потенциала шлака.

При высокой степени раскисления покрытия (шлака) отмеченная выше разница в переходе элементов из электродной проволоки и из покрытия заметно стирается.

Таким образом, для хорошо раскисленного покрытия коэффициенты перехода элементов из покрытия и из проволоки близки между собой, при этом различия тем меньше, чем меньше сродство элемента к кислороду [44, 45, 49, 52, 54].

В работах [26, 47, 55] исследовали потери элементов на различных стадиях.

Сопоставление потерь элементов на стадиях капли и ванны показывает, что окисление марганца и кремния в первом случае протекает более интенсивно, чем во втором. Это связано, вероятно, с большими удельными поверхностями реагирующих фаз и большей концентрацией элементов на стадии капли [5, 26, 47, 55].

Интенсивному выгоранию углерода в каплях может способствовать также наблюдавшееся на этой стадии процесса кипение металла, облегчающее фазовый переход [5].

Из сказанного нельзя сделать вывод, что окисление углерода в ванне вообще невозможно, так как рассматривался случай, когда ванна легирована кремнием и марганцем (исходные концентрации их около 1 мас. %). При небольшом содержании раскислителей в ванне окисление углерода возможно.

Преимущественное окисление углерода в каплях отмечено и при сварке под флюсом [56 - 58].

Взаимодействие на разных стадиях может различаться не только по интенсивности, но и по направлению протекания реакций [5]. При наличии карбонатов и активных металлов (восстановителей) в покрытии возможно восстановление углерода и передача его от газовой фазы наплавленному металлу.

Данные эксперимента с электродами с основным типом покрытия показывают [5], что восстановление углерода происходит уже в каплях. Но восстановленный в капле углерод сохраняется только в том случае, если выгорание углерода в ванне подавляется наличием раскислителей. В случае же сильно окислительного покрытия углерод интенсивно окисляется в ванне, при этом теряется не только весь восстановленный углерод, но выгорает часть углерода, содержащегося в стержне.

Опыты показали [3], что около половины всех потерь марганца (42-49 %) составляют потери на стадии капли (в расплавленном шлаке и в металле капли). За счет реакций в твердой фазе при нагреве покрытия теряется 27-34 % и на стадии ванны 24 %, причем около 12-18 % всех потерь составляет марганец, оставшийся неокисленным в конечном шлаке в виде застрявших металлических частиц.

Выделить потери марганца в шлаке из общих его потерь на стадии капли и ванны не удалось. Но можно думать, что они больше потерь в покрытии при его нагреве, так как условия для протекания реакций в расплаве более благоприятны, чем в твердой фазе [3].

Также отмечается, что на стадии капли идет кремневосстановительный процесс из шлака [5].

В работе [21] были определены потери элементов на окисление и испарение в отдельности. В табл. 1.2 представлены результаты расчета потерь марганца и кремния на окисление и испарение. Определить долю испаряющегося углерода оказалось невозможно, поскольку его оксиды находятся в газообразном состоянии. Возможны также потери шлака в результате его разбрызгивания. Точное определение этих потерь весьма затруднено.

Таблица 1.2 - Потери марганца и кремния на окисление и испарение [21]

Элементы	Общие потери, %	Потери на окисление		Потери на испарение	
		%	Доля общих потерь	%	Доля общих потерь
Mn	44,5	4,5	0,10	40,0	0,90
Si	16,0	2,4	0,15	13,6	0,85

На основании вышеизложенного И.Р. Пацкевич [21] сделал следующие выводы:

- отношение количества испаряющегося электродного металла к количеству расплавляющегося возрастает с увеличением времени горения дуги и ростом тока;
- повышение теплопроводности и окислительной способности газовой среды усиливает испарение;
- количество испаряющегося и окисляющегося электродного металла увеличивается с расходом газа;
- значительную долю потерь элементов электродного металла составляют потери на испарение.

### ***1.2.3.3 Процессы, протекающие в твердо-жидкой фазе.***

Процессы, протекающие в период кристаллизации металла шва, не оказывают влияния на коэффициенты перехода элементов. Температура металла такова, что изменяется только структурный состав металла.

### 1.2.4 Расчет состава металла шва по методу материального баланса

Разработка математической модели химических процессов при дуговой сварке требует учета их физико-химических закономерностей, в том числе кинетики реакций между жидкими металлом и шлаком. Эти процессы являются гетерогенными и обычно протекают в диффузионном режиме. Поэтому необходимо изучение массообмена между металлом и шлаком [59].

Состав шва формируется как итог химических взаимодействий в реакционных зонах, а также непрерывного поступления в ванну металла с плавящегося электрода и основного металла. Роль каждого из процессов, их влияние на конечное содержание элементов в шве зависят от вида сварки, составов электродного и основного металлов, параметров режима и многих других факторов [59].

Используя известный в химической технологии кибернетический подход, можно представить зону сварки как совокупность реакторов непрерывного действия, в которых осуществляется взаимодействие фаз и которые обмениваются веществом друг с другом. Роль таких реакторов в данном случае играют отдельные этапы (стадии). Процесс сварки можно рассматривать как непрерывно протекающий обмен веществом между отдельными фазами. Совокупность всех фаз составляет систему, в которую реагенты поступают со сварочными материалами и из атмосферы, а удаляются с продуктами сварки. Очевидно, что состав последних может быть найден из уравнений материального баланса, составленных для каждой фазы [59].

Авторы работ [60, 61] разработали математическую модель, отражающую кинетику химических реакций при сварке под флюсом и позволяющую прогнозировать состав шва с учетом следующих особенностей процесса:

- взаимодействие металла со шлаком на двух последовательных стадиях – электрода (капли) и ванны, отличающихся температурными, геометрическими и гидродинамическими условиями;

- непрерывного обновления взаимодействующих масс металла и шлака на каждой стадии в результате плавления и кристаллизации присадочного и основного металла и флюса;

- наличия электролиза при шунтировании части тока дуги жидким шлаком;

- одновременности протекания всех реакций на каждой стадии и их взаимного термодинамического и кинетического влияния;

- влияния на скорость каждой реакции диффузионных торможений всех реагентов в металле и шлаке и замедленности химического акта разряда ионов на границе металл-шлак.

Данная математическая модель представляет собой систему уравнений, позволяющих рассчитывать скорости взаимодействия фаз и на этой основе – состав металла и шлака. Такие уравнения можно записать для каждого элемента [62].

В работе [63] сделана попытка создать математическую модель на основе материального баланса элементов (1.7).

$$[\text{Э}_i]_{\text{н.м.}} = \eta_{\text{Э}_i} \left( [\text{Э}_i]_{\text{ст}} + \frac{G_{\text{покр}}}{G_{\text{ст}}} \sum_{j=1} \% \text{фер}_j [\text{Э}_i]_j \right) \quad (1.7)$$

где  $[\text{Э}_i]_{\text{н.м.}}$  - содержание химического элемента в наплавленном металле, мас. %;

$G_{\text{покр}}$  – масса электродного покрытия, г;

$G_{\text{ст}}$  – масса электродного стержня, г;

$\% \text{фер}_j$  – концентрация ферросплава  $j$  в покрытии, мас. %;

$[\text{Э}_i]_j$  - концентрации элемента  $\text{Э}_i$  в ферросплаве  $j$ , мас. %;

Но в этой модели присутствует, на мой взгляд, грубое допущение – шлакообразующие и стабилизирующие материалы из покрытия электрода не участвуют в химических реакциях, а только защищают сварочную ванну. С этим трудно согласиться, так как некоторые компоненты присутствуют в начальном составе шлака и не могут не участвовать в процессе восстановления этого компонента. Кроме того, по моему мнению, расчетная формула сильно упрощена и не дает реальной картины перехода элементов в металл шва.

### 1.2.5 Расчет состава металла шва по термодинамической модели

В основу термодинамической модели процесса ручной дуговой сварки покрытыми электродами были положены известные физические представления о механизме протекания гетерогенных реакций [11].

Для обеспечения правильности термодинамических расчетов необходимо знание температуры, при которой протекают химические реакции.

Как отмечено в [7], температура дуги при ручной сварке зависит от составов покрытия и стержня электрода, силы сварочного тока, напряжения дуги, коэффициента массы покрытия и других факторов. Средняя температура дуги, определяемая температурой ее столба, при ручной дуговой сварке составляет 5473-5873 К. Причем более высокую температуру имеет дуга на электродах с кислым покрытием, менее высокую — на электродах с основным покрытием. Температура металла в области анодного пятна достигает 2873-4073 К, в области катодного — 2673-3473 К. Более низкая температура металла на катодном пятне обусловлена затратой катодом энергии на эмиссию электронов.

Вместе с тем определение температуры, особенно на стадии плавления электродного металла, сопряжено с большими трудностями, связанными с кратковременностью существования, малыми объемами металла, большими градиентами температур, наличием шлака, большого количества выделяющихся газов и втулочки из неоплавившегося покрытия на торце электрода.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили три метода для измерения температуры капле электродного металла. Это метод калориметрирования, разработанный В.И. Шумкиным [64], метод микропирометрии [65] и метод прямого измерения температуры металла капли с помощью термопары погружения, разработанный и впервые примененный В.Н. Горпенюком и И.К. Походней [26, 66]. Также имеются несколько расчетных методик определения температуры капли [19, 67].

Результаты, полученные методом калориметрирования, варьируются в пределах от 2100 до 2700 К на токах, характерных для ручной дуговой сварки (125-195 А) [5, 64, 68, 69].

Следует отметить, что метод калориметрирования применим только для сварки голым и тонкопокрытым электродом, то есть когда можно пренебречь долей тепла, вносимой шлаком. При расплавлении толстопокрытых электродов количество шлака достигает 20—40 % от массы расплавленного металла. Отсутствие же данных о теплоемкости шлаков при высоких температурах не позволяет точно оценить их вклад в теплосодержание металла каплей. Таким образом, приведенные температуры для электродов с нормальной толщиной покрытия УОНИ-13/45 и ОММ-5 определены с погрешностью не превышающей 20 %.

Метод микропирометрии [65] также непригоден для исследования температуры каплей электродов с нормальной и увеличенной толщиной покрытия из-за втулки, образующейся на торце электрода при его плавлении.

Для измерения температуры капли, находящейся на торце электрода с нормальной и увеличенной толщиной покрытия пригоден только метод прямого измерения температуры с помощью термопары погружения [3].

Эксперимент проводился с рутиловыми электродами марки АНО-4 диаметром 8 мм. Жидкая капля на торце такого электрода имела правильную коническую форму. Полученные результаты показывают, что средняя величина мгновенной температуры увеличивается как по высоте капли, так и с повышением сварочного тока [3].

Экспериментально установлено [3, 5, 64, 68, 70], что с увеличением тока в электродах всех типов температура каплей возрастает и достигает 2423 – 2623 К. Однако, скорость увеличения температуры и величина сварочного тока, при которой фиксируется максимальная температура, для каждой марки электродов индивидуальны (рис. 1.3).

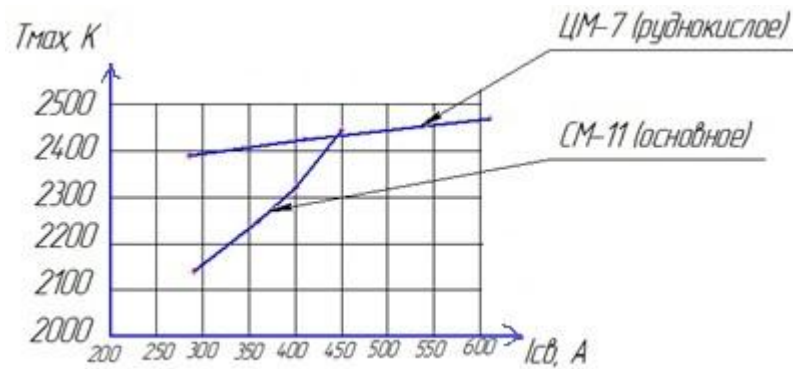


Рисунок 1.3 – Зависимость максимальной температуры капель от величины сварочного тока [3]

Увеличение длины дуги и толщины покрытия дают экстремальные зависимости температуры капель (рис. 1.4, 1.5) [3].

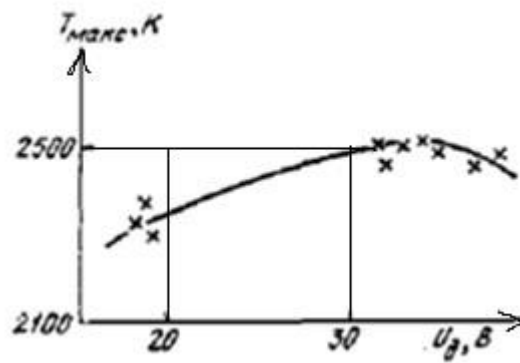


Рисунок 1.4 – Зависимость температуры капель от напряжения дуги [3]

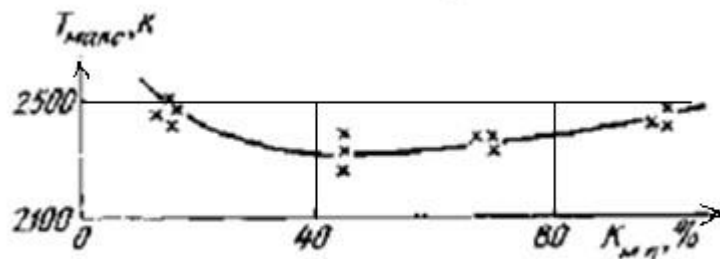


Рисунок 1.5 – Зависимость температуры капель от коэффициента массы покрытия электродов АНО-4 ( $d_s = 8$  мм) [3]



В работе [69] предложена методика для расчета температуры капли электродного металла в зависимости от силы тока (1.8).

$$T_K = T_{\text{кп}} \cdot \left[ 1 - \frac{\rho_T \cdot j \cdot l}{U_{\text{Э}}} \left( 1 - \frac{T_{\text{пл}}}{T_{\text{кп}}} \right)^2 \right] \quad (1.8)$$

где  $T_K$  - средняя температура металла капли, К;

$T_{\text{кп}}$  - температура кипения металла, К;

$\rho_T$  - удельное сопротивление электродного металла, Ом/м;

$j$  - плотность тока, А/мм<sup>2</sup>;

$l$  - вылет электродной проволоки, мм;

$U_{\text{Э}}$  - эффективное падение напряжения в приэлектродной области, В;

$T_{\text{пл}}$  - температура плавления металла электрода, К.

Отсутствие в уравнении такого важного параметра как скорость сварки делает невозможным учет нагрева электрода проходящим током.

Ту же задачу решали в работе [67] используя метод конечных элементов:

$$T(y) = \frac{T_{\text{кип}} - T_{\text{пл}}}{y_{\text{кип}} - y_{\text{пл}}} (y - y_{\text{пл}}) + T_{\text{пл}} \quad (1.9)$$

где  $T(y)$  - температура металла по заданной координате, К;

$T_{\text{кип}}$  - температура кипения электродного металла, К;

$T_{\text{пл}}$  - температура плавления электродного металла, К;

$y_{\text{кип}}$  - координата нижней точки капли, см;

$y_{\text{пл}}$  - координата, соответствующая торцу электрода, см.

В данной работе отсутствует привязка к параметрам режима, что мне кажется не совсем корректно.

Расчеты показали, что средняя температура капель составляет 2140 – 2470 К при токах соответственно 200-500 А [69] и 2486 - 2800 К [67].

Точный расчет количества теплоты, затрачиваемой на нагрев и плавление покрытия, требует знания механизма протекающих при этом превращений и в настоящее время затруднителен для электродных покрытий. При сварке расчет также осложняется отсутствием данных о температуре, достигаемой покрытием (шлаком) при его плавлении [71].

И экспериментальные и расчетные методики дают достаточно широкий диапазон температуры капли металла, что делает проблематичным применение термодинамических моделей.

При изучении металлургических процессов при сварке во многих работах использовались закономерности химической термодинамики, с помощью которой исследовалось возможное развитие реакций при сварке и были получены важные в теоретическом и практическом отношении выводы [31, 72]. Однако термодинамический анализ служит главным образом целям качественной оценки процессов при сварке; количественные же расчеты равновесий развиты крайне слабо, что вызвано рядом трудностей, связанных с выбором температуры, к которой следует относить расчет равновесия, отсутствием исходных данных для расчета сварочных систем и др. [5].

В зоне сварки одновременно существуют области металла с температурой, изменяющейся в широком диапазоне, — от температуры, близкой к точке кипения, до температуры кристаллизации. Поэтому нельзя говорить о равновесии применительно ко всей зоне сварки в целом [73]. Экспериментальным подтверждением этого служат данные Б.И. Брука [74], Дж. Клауссена [75], В.В. Подгаецкого [4].

Протекание реакций между металлом и шлаком [5] зависит не только от состава, но и от относительного количества взаимодействующих фаз. Относительная масса шлака влияет также и на равновесную концентрацию элемента.

Стадия капли - первая стадия процесса. Здесь начинается взаимодействие, система наиболее удалена от равновесия и скорость реакций максимальна, так как чем больше разность между начальными и равновесными концентрациями, тем больше действующая в системе «термодинамическая сила» и тем больше при прочих равных условиях должна быть скорость процесса [76].

На стадию ванны система приходит уже с другими концентрациями реагентов, приблизившись к равновесию. Скорость реакций должна быть меньше. Поэтому в ванне можно ожидать менее интенсивного протекания реакции.

Данные исследований [5] позволяют сделать вывод, что сварочная ванна является квазистационарной системой как в геометрическом и тепловом, так и в физико-химическом отношении. Этим ванна отличается от капли, где к моменту перехода капли квазистационарное состояние, как правило, не достигается.

При сравнении условий взаимодействия на разных стадиях процесса [5] можно оперировать следующими данными (табл. 1.3):

Таблица 1.3 – Условия взаимодействия фаз на стадиях капли и ванны

Стадия	Средняя температура, К	Усредненное время контакта, с	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг
Капли	2073 - 2673	0,01 - 1,0	$(1 - 10) \cdot 10^{-3}$
Ванны	1873 - 2173	0,8 - 6	$(0,25 - 1,1) \cdot 10^{-3}$

Применение термодинамического подхода требует достаточно точного определения температуры взаимодействия, а она может меняться в зависимости от изменения параметров режима и состава покрытия электрода. Поэтому термодинамические модели применимы для условий автоматизированной сварки, когда параметры поддерживаются относительно постоянными.

### 1.2.6 Расчет состава металла шва по кинетическим моделям

Особое место занимают математические модели, основанные на кинетике процессов взаимодействия.

Исследованию плавления и переноса металла при дуговой сварке посвящены работы В. И. Дятлова, А. А. Ерохина, А. Г. Мазеля, И. К. Походни, И.И. Зарубы, А.Г. Потапьевского, Т. Йошиды, Д. Рефельда, Ф. Эрдмана-Еснитцера и других отечественных и зарубежных ученых [5, 8, 26, 36, 37, 77, 78].

По данным работы [5] основными параметрами перехода электродного металла являются время роста капли на электроде  $\tau$ , частота переходов  $N$  и масса переходящей капли  $m_n$ . Под переходом понимается микропроцесс, включающий стадии роста капли и ее отделения от электрода.

Продолжительность взаимодействия капли с окружающей средой во многом зависит от характера плавления и переноса металла. Определение данного важнейшего кинетического параметра по частоте перехода  $N$  и массе переходящих капель  $m_n$  невозможно, поскольку отрывающаяся капля является лишь частью жидкого металла на торце электрода [3].

Анализ работ [8, 26, 36, 77] показывает, что их авторы при исследовании процессов плавления электрода не разделяют две стадии — формирования капли и переноса ее через дуговой промежуток. Однако для кинетических расчетов химического состава капель и металла шва при различных условиях сварки крайне важно иметь сведения о характеристиках переноса металла.

Результаты обработки кинограмм процесса сварки голой проволокой показали [5, 8, 79], что масса капли на торце электрода колеблется около некоторого среднего значения, подчиняясь законам случайных величин и составляет 0,04 – 0,12 г. В этих же работах был сделан вывод, что при сварке голыми и тонкопокрытыми электродами средняя скорость роста капель для конкретных условий сварки практически постоянна.

Наличие на стержне многокомпонентного покрытия нормальной или повышенной толщины существенно изменяет характер плавления и переноса электродного металла. В связи с этим авторами работы [3] были предприняты исследования кинетики плавления покрытых электродов. Исследования показали, что при сварке электродами с нормальной толщиной покрытия и при обычных плотностях тока (4—14 А/мм<sup>2</sup>) металл переносится каплями различных размеров [3], что определяется типом электродного покрытия. Масса капель, проходящих через дуговой промежуток, при сварке электродами с рутиловым покрытием меньше, чем с основным. Соотношение массы отрывающейся частицы и массы капли зависит не только от типа электродного покрытия, но и от параметров режима (величина сварочного тока).

В работе [80] установлено, что для электродов с фтористо-кальциевым покрытием характерен крупнокапельный перенос. По мнению авторов, это может быть вызвано влиянием поверхностных свойств металла на границе со шлаком.

При сварке электродами с рутиловым покрытием на торце электрода постоянно висит капля жидкого металла, от которой через определенные промежутки времени отрываются мелкие частицы металла.

Результаты исследований показали [81], что характер переноса капель зависит от степени развития реакции образования  $CO$ : чем спонтаннее и интенсивнее эта реакция, тем меньших размеров переходящие через дуговой промежуток капли.

Что касается времени взаимодействия, то оно определяется временем существования капли на торце электрода и временем ее перехода через дуговой промежуток. По мнению [5], время роста капли (время между двумя переходами), определяемое с помощью скоростной киносъемки, осциллографированием или другими методами, не равнозначно времени взаимодействия капли с окружающей средой. Это связано с тем, что металл капли перед очередным переходом можно представить состоящим из двух частей: металла, оставшегося после предыдущего перехода, и металла, расплавленного после этого. Таким образом, целесообразно оперировать усредненным по объему временем жизни капли, которое для исследованных режимов лежит в пределах 0,05-0,35 с [5, 44]. Это время будет варьироваться и в зависимости от вида переноса металла [5, 82].

В работе [5] отмечено, что определение объема и поверхности капли по данным киносъемки весьма затруднительно вследствие того, что форма капли непрерывно меняется под действием различных сил и часто отклоняется от правильной симметричной формы тела вращения.

Другими основными кинетическими характеристиками процесса плавления электрода по [5] являются скорость плавления электрода, коэффициенты наплавки, расплавления и потерь.

В.П. Вологдин [83] показал, что в диапазоне обычных режимов ручной дуговой сварки скорость плавления электрода можно принять пропорциональной току. Наличие толстого слоя покрытия на электроде, во-первых, уменьшает долю теплоты, расходуемой на плавление металла стержня, снижая скорость его плавления, и, во-вторых, облегчает удержание большей капли на электроде

вследствие образования трубочки из покрытия, внутри которой располагается капля. Поэтому следует ожидать при сварке покрытыми электродами больших значений времени роста капель и массы переходящей части капли, чем при сварке голыми или тонкопокрытыми электродами, что подтверждается опытными данными для некоторых марок электродов (УОНИ-13, ВН-47, СМ-11) [5, 84]. Было отмечено влияние на коэффициент плавления состава покрытия [85, 86]. Отмечается также и неравномерность плавления электрода из-за его подогрева проходящим током дуги [3].

Основными характеристиками сварочной ванны являются [5] масса ванны, усредненное время ее существования и ее объем; удельная поверхность сварочной ванны; температура металла в сварочной ванне.

По данным [5] ванна образуется из расплавленного основного и электродного металла. В установившемся процессе количество расплавляемого и кристаллизующегося в единицу времени металла в среднем одинаково, и ванну можно считать находящейся в квазистационарном состоянии. Размеры ванны и связанные с ними другие важные ее параметры зависят главным образом от скорости или производительности расплавления основного и электродного металла.

Непосредственное определение массы ванны представляет большие трудности вследствие того, что при выливании жидкого металла из ванны любым способом на стенках ванны остается некоторое количество быстро затвердевающего металла.

Автором работы [5] была предложена собственная методика определения массы сварочной ванны. Однако, она требует проведения трудоемкого эксперимента и специального оборудования.

Время существования ванны зависит от режима сварки, так что последний может оказывать влияние на некоторые металлургические процессы в ванне, например, на всплывание и удаление из ванны неметаллических включений, что и подтверждается экспериментально [5].

Взаимодействие металла ванны с газами и шлаком развивается на поверхности раздела фаз. Поэтому представляет интерес оценить поверхность зеркала ванны [5].

Работа [87] посвящена аналитическому определению площади межфазного взаимодействия и массы ванны в зависимости от скорости сварки и погонной энергии (1.10):

$$S_{\text{ж-г}} = 5,4 \cdot 10^{-5} \frac{q}{V_{\text{св}}^4 \cdot \delta^9} \left[ (4V_{\text{св}}^4 \cdot \delta^6 + 2,2 \cdot 10^{-13} \cdot q^4)^{3/2} - 0,103 \cdot 10^{-18} \cdot q^6 \right] \quad (1.10)$$

где  $S_{\text{ж-г}}$  - площадь межфазной поверхности расплавленной ванны – защитная атмосфера,  $\text{см}^2$ ;

$q$  – мощность источника нагрева, Вт;

$V_{\text{св}}$  – скорость сварки, м/с;

$\delta$  – толщина пластины, м.

При этом не представляется возможным учесть изменение других параметров режима при сохранении величины погонной энергии или изменение теплофизических свойств материалов.

Расчеты показали, что значения удельной поверхности ванны (отношения площади зеркала ванны к ее массе) колеблются с изменением режима в сравнительно узких пределах:  $0,3 \cdot 10^{-3}$ — $13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ , поскольку поверхность ванны растет медленнее ее объема [5].

Говоря о контакте взаимодействующих фаз при сварке, необходимо отметить наличие значительного перемешивания металла и шлака, что увеличивает межфазную поверхность металл - шлак. В некоторых исследованиях придается большое значение взаимодействию металла и шлака в ванне. Наряду с непосредственным стеканием шлака на поверхность ванны часть его, окружающая капли на электроде, погружается вместе с ними в ванну и перемешивается с металлом. Всплывая, частицы шлака как бы «промывают» металл [88, 89].

Однако перемешивание металла и шлака происходит не только в ванне, но и в каплях. Капля непрерывно изменяет свою форму, и поверхность ее испытывает

местные сжатия и растяжения. При этом всегда возможны разрывы шлаковой пленки на отдельных участках и «захлестывание» шлака жидким металлом.

Известно, что химический состав наплавленного металла зависит от режима сварки. Особенно изменяется состав переплавленного электродного металла при сварке на малых токах и высоких напряжениях [3, 5, 83]. Объясняют это явление по-разному. Б.Е. Патон [57] высказал мнение, что при уменьшении тока увеличивается время контакта металла со шлаком. И.И. Фруммин [31, 90] связывает влияние режима сварки на химический состав металла с изменением соотношения количеств расплавленных флюса и металла (относительной массы шлака). Г.Л. Петров и И.Т. Минаков [91] высказали предположение о связи интенсивности взаимодействия металла и шлака с характером переноса металла. По их мнению, с металлом электрода реагирует не весь расплавленный флюс, а лишь та часть, которая окружает капли металла при переносе через дуговой промежуток [92].

Эксперимент показывает, что по относительной массе шлака нельзя судить об интенсивности взаимодействия между шлаком и металлом, так как не вся масса расплавленного флюса взаимодействует с металлом [82].

Вследствие больших размеров капель металла при одной и той же силе тока относительное время взаимодействия в случае сварки на прямой полярности уменьшается, что и оказывает, по-видимому, основное влияние на снижение интенсивности взаимодействия металла и шлака [82].

В работе [93] разработан аналитический метод количественного расчета основных кинетических и температурных параметров электродных капель, переходящих дуговой промежуток с короткими замыканиями.

Авторы работы [60] создали математическую модель, отражающую кинетику химических реакций при сварке под флюсом и позволяющую прогнозировать состав металла шва с учетом некоторых особенностей процесса. Зависимости входных величин (доля участия основного металла, площадь реакционной поверхности ванны, площадь реакционной поверхности капли) от параметров режима найдены статистическим путем, то есть для определенных



условий сварки. С другой стороны, подобный расчет может дать достаточно верный результат только для автоматизированной сварки, когда сохраняется постоянство параметров режима. При ручной дуговой сварке прогнозировать размер капель и размеры реакционных площадей можно только приблизительно.

Большое количество работ И.К. Походни посвящено кинетике выделения газов при высокой скорости нагрева [19, 94]. Для этого используется метод расчета, основанный на определении энергии активации реакции термического разложения и других кинетических параметров. Но данная модель настолько сложна, что не представляется возможным ее практическое применение.

В литературе имеется еще несколько методик, позволяющих определить скорость плавления электродной проволоки [95], объем выделения твердой составляющей сварочного аэрозоля [96], долю участия основного металла в металле шва [97]. Оценено влияние типа источника питания на температуру капли (за счет тепловложения) при одинаковом среднем токе [98]. Проведено моделирование магнитогидродинамических процессов [99], позволяющих определять температурный режим в сварном соединении. Но все эти модели решают лишь частные задачи, не позволяя рассчитывать состав металла шва в зависимости от параметров режима.

Часть работ [100, 101] посвящены моделированию каплепереноса при сварке. Анализ рассмотренных методов позволяет сделать вывод, что наибольшую полноту информации о переносе электродного металла дают методы скоростной киносъемки или рентгеносъемки, совмещенные с методом осциллографирования. Кроме процесса переноса они позволяют судить и о кинетике плавления электродного металла [102].

В заключение можно отметить, что все приведенные модели не удовлетворяют требованиям адекватности, простоты, рациональности, удобства и практичности. Поэтому необходимо разработать такую математическую модель процесса ручной дуговой сварки покрытыми электродами, которая бы позволила проводить расчет химического состава металла шва, а также решать обратную

задачу – создание новых экономнолегированных сварочных материалов на научной основе.

Выводы по главе 1:

1. Имеющиеся в литературе физические модели и методы прогнозирования состава металла шва при ручной дуговой сварке либо используют данные и соотношения, которые недостаточно достоверны и трудноопределимы (площадь контакта металл-шлак, температура капель, время и скорость взаимодействия фаз), либо дают полуколичественные результаты.

2. Целесообразно разработать физическую и математическую модели процесса ручной дуговой сварки покрытыми электродами, основанную на полном материальном балансе элементов в металле и шлаке, и провести их экспериментальную проверку.

3. Анализ литературных данных позволяет выделить следующие показатели, которые необходимо учесть в разрабатываемой математической модели:

- на окислительно-восстановительные процессы при нагреве и плавлении электрода для ручной дугой сварки оказывает влияние коэффициент массы покрытия;

- отдельные компоненты покрытия электрода претерпевают физико-химические превращения до начала плавления покрытия и электродного стержня и к моменту плавления состав покрытия не соответствует составу шихтовки.

- при сварке покрытыми электродами основными причинами потерь металла являются испарение и разбрызгивание, при этом потери на разбрызгивание составляют более 50 % всех потерь.

## **ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФАЗ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ**

Как показано в главе 1, известные методы термодинамического и кинетического анализа, а также данные о механизме отдельных стадий гетерогенных реакций при моделировании ручной дуговой сварки не позволяют получить достаточно адекватную модель процесса и использовать ее для дальнейших расчетов [5, 66-69, 87, 93]. Это связано, прежде всего, с высокой скоростью и кратковременностью протекания взаимодействия, а также невозможностью достоверно оценить площадь взаимодействия.

Расчет состава шва по смешению удобен для предварительной оценки, однако дает приблизительный результат. Модель, основанная только на регрессионных уравнениях, дающих зависимость коэффициентов перехода от одного-двух параметров, имеет ограниченное применение, так как расчетные значения носят полуколичественный характер [2, 13, 14].

Поэтому была поставлена задача разработать физическую и математическую модели процессов при РДС, основанные на полном материальном балансе каждого из элементов в каждой из фаз [103].

### **2.1 Разработка физической модели процесса сварки покрытыми электродами**

Физическая модель процесса сварки покрытыми электродами необходима для описания всех процессов, протекающих в зоне сварки с момента зажигания дуги и до момента окончания сварки (или достижения квазистационарного состояния). Для создания физической модели необходимо учесть следующие физические процессы, протекающие в зоне сварки [6-9]:

- нагрев электрода проходящим током и теплотой дуги;
- химическое взаимодействие компонентов покрытия;
- плавление электрода;
- перенос электродного металла в сварочную ванну;

- плавление основного металла;
- перемешивание основного и электродного металлов в сварочной ванне;
- кристаллизация металла шва.

Все вышеизложенное можно представить в виде схемы на рисунке 2.1: электрод является поставщиком металлических капель, которые формируют наплавленный металл. Капли образуются при плавлении электродного стержня, металлической части покрытия и металла, восстановленного из шлака. Весь этот металл переходит в сварочную ванну, смешивается с основным металлом и после кристаллизации образует сварной шов.



Рисунок 2.1 - Физическая модель формирования наплавленного металла (шва)

Физическая модель и перечисленные выше физико-химические процессы, позволяют моделировать состав и свойства наплавленного металла в том случае, если основной металл не оказывает влияния на формирование сварочной ванны. Если основной металл участвует в формировании сварного шва, то модель применима для описания процесса ручной дуговой сварки покрытыми

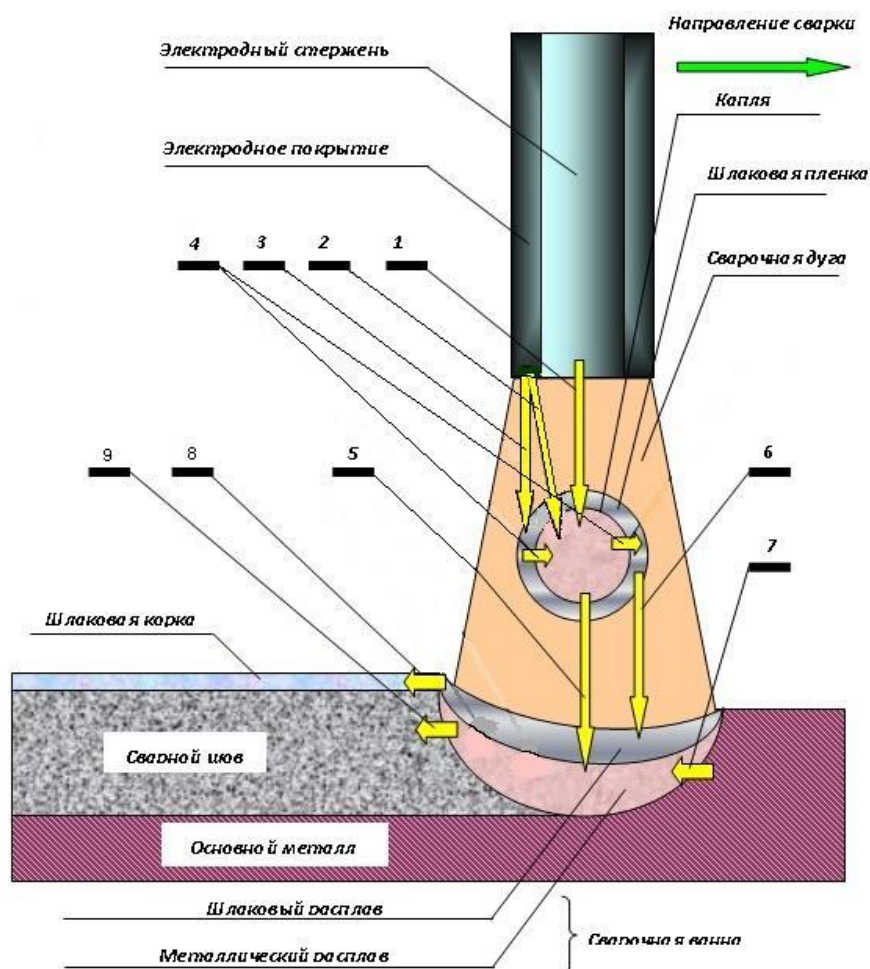
электродами.

На основании имеющихся в настоящий момент данных можно предложить следующую схему физико-химических процессов, протекающих при ручной дуговой сварке покрытыми электродами.

Дуга прямого действия горит между электродом и основным металлом. При этом торец покрытого электрода нагревается до температуры порядка 2100-2300°C. Нагрев до таких температур происходит за счет теплоты сварочной дуги, а также теплоты, выделяющейся в самом электроде при прохождении через него сварочного тока.

Теплотой дуги расплавляются стержень электрода, покрытие электрода и основной металл. Покрытие представляет собой смесь различных минералов, органических веществ и металлических добавок в дисперсном состоянии, сцементированных жидким стеклом или другими связующими [7, 9]. Плавление покрытия, так же как и электродного стержня, происходит за счет теплоты дуги, теплоты химических реакций, протекающих при плавлении покрытия, и теплоты, выделяемой при прохождении тока по стержню электрода [7]. Роль последней при обычных режимах сварки невелика. Следует отметить, что покрытие плавится медленнее, чем стержень, поэтому на торце электрода возникает втулочка из покрытия.

Капля металла, сформировавшаяся на торце электрода, может состоять из расплавившихся стержня и металлических компонентов шихты. Кроме того, капли могут быть покрыты жидким шлаком, который образуется, в основном, при плавлении неметаллических компонентов покрытия. На границе металлической капли и жидкого шлака могут протекать окислительно-восстановительные процессы, изменяющие состав фаз. Таким образом, покрытие, в зависимости от его состава, расходуется на формирование металлической и шлаковой ванн. Так как шлак имеет меньшую плотность, чем металл, он всплывает на поверхность сварочной ванны. По мере поступательного движения электрода, сварочная ванна кристаллизуется, образуя сварной шов, покрытый шлаковой коркой. Этот процесс проиллюстрирован на рисунке 2.2.



1 – плавление электродного стержня и формирование металлической капли; 2 – плавление металлической части электродного покрытия и формирование металлической капли; 3 – плавление неметаллической части электродного покрытия и формирование шлаковой пленки; 4 – перенос элементов из шлаковой пленки в металлическую каплю и из металлической капли и шлаковую пленку (в виде оксидов); 5- перенос капель металла в металлический расплав; 6 – перенос шлаковой пленки в шлаковый расплав; 7 – плавление основного металла и формирование сварочной ванны; 8 – затвердевание шлакового расплава; 9 – кристаллизация металлического расплава.

Рисунок 2.2 - Физическая модель сварки покрытыми электродами [104]

В реакционной зоне формируется поле достаточно высоких температур, из-за чего некоторая доля элементов металла и компонентов шихты может испаряться. Вектор сил, действующих на каплю может быть направлен не только вдоль оси электрода, а в любом другом направлении, поэтому необходимо учитывать такое явление как разбрызгивание (рис. 1.2). Согласно литературным

данным [25-27] суммарное количество испарившегося металла в процессе ручной дуговой сварки составляет не более 5 %, что сопоставимо с ошибкой эксперимента. Потери металла на разбрызгивание могут составлять от 5 до 20 %, поэтому этой величиной пренебрегать нельзя. Коэффициент потерь на разбрызгивание определяется составом электродного покрытия, силой сварочного тока (размер и частота перехода капель, тип переноса электродного металла), а также некоторыми другими факторами.

Процесс плавления электрода разделим на три стадии, различающиеся по температурным, геометрическим, гидродинамическим и физико-химическим характеристикам.

Первая стадия – это нагрев и плавление электрода. Она в свою очередь подразделяется на нагрев электрода до температуры плавления и плавление. Во время нагрева происходят такие процессы, как диссоциация различных соединений, испарение воды, окисление ферросплавов и взаимодействие шихтовых материалов в твердом состоянии. На подстадии плавления образуются три вида капель: капли металла, капли шлака и капли металла, покрытые шлаком.

Вторая стадия – это перенос капель от электрода в ванну (стадия капли). Механизм переноса электродного металла определяется параметрами режима, типом покрытия электрода и тепло-физическими свойствами материалов. В этот период происходит множество разнообразных взаимодействий: компонентов капель металла и капель шлака с газовой фазой и между собой, ферросплавов, содержащихся в покрытии, со шлаком.

Третья стадия – стадия ванны. Формирование состава металла шва происходит за счет смешивания наплавленного и основного металлов. Согласно [3, 5, 21], процессы взаимодействия в сварочной ванне замедляются и не оказывают существенного влияния на химический состав металла шва.

В соответствии с рис. 2.2 представим эти взаимодействия с помощью схемы (рис. 2.3).

Анализ разработанной физической модели позволяет сделать следующие выводы:

1. В модели учтены процессы переноса вещества, формирующие металлическую и шлаковую ванны.

2. Формирование металлической ванны при плавлении электрода обеспечивается поступлением металла стержня и ферросплавов из покрытия. Учитываются также процессы восстановления элементов из неметаллической части покрытия.

3. Формирование металлической ванны при ручной дуговой сварке обеспечивается смешением основного и наплавленного металлов.

4. Шлаковая ванна формируется за счет плавления неметаллической части покрытия и окисления металлических компонентов.

5. Потери металла и шлака на разбрызгивание и испарение могут составлять от 5 до 20 %, поэтому необходимо их учесть введением соответствующих коэффициентов.

Таким образом, разработана физическая модель, которая показывает структуру процесса, взаимодействие и перенос компонентов, а также формирование металлической и шлаковой ванн.



Рисунок 2.3 - Блок-схема плавления электрода



Вышеизложенная физическая модель формирования состава наплавленного металла и металла шва при ручной дуговой сварке покрытыми электродами была положена в основу разработки математической модели процесса.

Математическая модель будет представлять систему уравнений на основе полного материального баланса, совместное решение которых позволяет рассчитать концентрацию элементов в наплавленном металле или металле шва. Эти же уравнения могут служить решению задачи подбора шихтового состава покрытия электрода [105].

## **2.2 Разработка математической модели процесса сварки покрытыми электродами**

Представленная в предыдущем разделе физическая модель формирования состава наплавленного металла и металла шва при ручной дуговой сварке покрытыми электродами была положена в основу создания математической модели.

Использование при исследовании метода математического моделирования позволяет определить, насколько соответствует излагаемое физическое представление действительному ходу процесса. Об этом можно судить по сходимости расчетных и экспериментальных данных.

Для разработки математической модели [106] опишем процесс сварки балансowymi уравнениями, учитывающими переход всех элементов в металлическую и шлаковую ванны, их потери (выгорание, окисление) и прирост (восстановление).

При выводе уравнений модели были приняты следующие допущения и упрощения:

- для данного типа сварочных материалов суммарный эффект всех реакций с участием данного элемента на всех стадиях можно оценить усредненным коэффициентом перехода  $\bar{\eta}_{\text{э}_i}$ , сохраняющим постоянное значение в определенном диапазоне параметров режима сварки;

- усредненный коэффициент перехода элемента  $\text{Э}_i$  может быть выражен через парциальные коэффициенты перехода этого же элемента, которые характеризуют результат окислительно-восстановительных процессов на каждой стадии;

- количество металла и шлака, потерянное на разбрызгивание и испарение, зависит от параметров режима сварки. Эти зависимости будем учитывать введением поправочных коэффициентов, определяемых по экспериментальным данным;

- металлическая и шлаковая ванны являются реакторами идеального смешения.

Степень (полноту) перехода элемента  $\text{Э}_i$  в наплавленный металл или металл шва можно охарактеризовать усредненным коэффициентом перехода (усвоения)  $\bar{\eta}_{\text{Э}_i}$ , понимаемым как доля массы элемента  $\text{Э}_i$ , остающаяся в наплавленном металле (металле шва):

$$\bar{\eta}_{\text{Э}_i} = \frac{m_{\text{Э}_i}^{\text{напл}}}{m_{\text{Э}_i}^{\text{смеш}}}, \quad (2.1)$$

где  $\bar{\eta}_{\text{Э}_i}$  - усредненный коэффициент перехода элемента  $\text{Э}_i$ ;

$m_{\text{Э}_i}^{\text{напл}}$  - масса элемента  $\text{Э}_i$  в данном объеме металла после взаимодействия, кг;

$m_{\text{Э}_i}^{\text{смеш}}$  - масса элемента  $\text{Э}_i$  в металле без учета химических реакций, кг.

Очевидно, что величина  $(1 - \bar{\eta}_{\text{Э}_i})$  представляет степень окисления (потерю) элемента  $\text{Э}_i$  в процессе сварки.

Исходя из физической картины процесса, разделим создание математической модели на 2 этапа:

1 – формирование состава наплавленного металла, что позволит оценить адекватность математической модели по известным литературным данным,

2 – формирование состава сварного шва.

Для разработки математической модели выделим составляющие электрода, взаимодействие между которыми формирует состав металлической и шлаковой

ванн (рис.2.3): стержень электрода, металлическая часть покрытия и неметаллическая часть покрытия. Взаимодействие между выделенными составляющими электрода и газовой фазой приводит к изменению составов металла и шлака, поступающих в сварочную ванну.

Для описания этих процессов взаимодействия, которые отличаются температурными и гидродинамическими условиями, введем понятие парциальных коэффициентов перехода.

Значения парциальных коэффициентов перехода для каждого элемента на разных стадиях могут существенно различаться [9]. Так, на стадии нагрева можно ожидать окисления большинства компонентов ( $\eta_{\sigma_i} < 1$ ), особенно элементов с большим химическим сродством к кислороду (*Mn, Si, Ti, Al*). На стадии капли, напротив, те же самые элементы могут заметно восстанавливаются ( $\eta_{\sigma_i} > 1$ ).

Экспериментальное их изучение и теоретическое описание позволят установить полноту перехода элементов из электродного стержня и покрытия в наплавленный металл, а также оценить доли участия основного и присадочного металлов в сварном соединении [107].

### 2.2.1 Математическая модель формирования состава наплавленного металла

Общий коэффициент перехода элемента показывает, какая доля элемента теряется в процессе сварке. При плавлении электрода протекают следующие процессы в дуговом промежутке:

- плавление стержня электрода и формирование капель металла;
- плавление металлической части покрытия электрода (ферросплавов) и формирование капель металла;
- плавление неметаллической части покрытия электрода (оксидов, органических соединений) и формирование капель шлака;
- диссоциация компонентов покрытия;
- удаление газообразных компонентов из зоны сварки;

- восстановление металлических компонентов из оксидов шлака.

В соответствии с выделенными процессами, протекающими при плавлении электрода, введем следующие обозначения:

$K_1^{\mathcal{E}_i}$  - доля массы компонента  $\mathcal{E}_i$  металлической части покрытия электрода, окисленной газом и шлаком;

$K_2^{\mathcal{E}_i}$  - доля массы компонента  $\mathcal{E}_i$  металла стержня, окисленной газом и шлаком;

$K_3^{\mathcal{E}_i}$  - доля массы оксида компонента  $\mathcal{E}_i$  неметаллической части покрытия, переходящей в металл в результате реакций восстановления на стадии капли.

Введем уравнения связывающие величины  $K_1^{\mathcal{E}_i}$ ,  $K_2^{\mathcal{E}_i}$  и  $K_3^{\mathcal{E}_i}$  с парциальными коэффициентами перехода  $\eta_{\mathcal{E}_i}$ :

$$1 - K_1^{\mathcal{E}_i} = \eta_{\mathcal{E}_i}^{\phi}, \quad (2.2)$$

$$1 - K_2^{\mathcal{E}_i} = \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}}, \quad (2.3)$$

$$K_3^{\mathcal{E}_i} = \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}}, \quad (2.4)$$

где  $\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}}$ ,  $\eta_{\mathcal{E}_i}^{\phi}$ ,  $\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}}$  - парциальные коэффициенты перехода элемента  $\mathcal{E}_i$  в наплавленный металл из стержня, ферросплавов и шлака, соответственно.

Общий (усредненный) коэффициент перехода элемента  $\mathcal{E}_i$  отличается от единицы, так как на разных стадиях процесса сварки в зависимости от имеющихся условий элемент  $\mathcal{E}_i$  может окисляться, восстанавливаться и испаряться. В связи с этим можно предположить, что общий (усредненный) коэффициент перехода элемента  $\mathcal{E}_i$  имеет следующую взаимосвязь с парциальными коэффициентами перехода:

$$\bar{\eta}_{\mathcal{E}_i} = a\eta_{\mathcal{E}_i}^{\phi} + b\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}} + c\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + b(1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + cK_3^{\mathcal{E}_i}, \quad (2.5)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  - доли участия ферросплавов, электродного стержня и восстановленного из шлака металла в формировании наплавленного металла;  $\bar{\eta}_{\mathcal{E}_i}$  - общий (усредненный) коэффициент перехода элемента  $\mathcal{E}_i$ .

Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  связаны следующим соотношением (2.6):

$$a + b + c = 1 \quad (2.6)$$

Для определения  $\bar{\eta}_{\mathcal{E}_i}$  по уравнению (2.1) необходимо знать массу элемента в наплавленном металле фактическую и рассчитанную по смешению.

Фактическую массу элемента в наплавленном металле можно найти, зная химический состав наплавленного металла, определенный по справочным данным или на основе данных эксперимента.

Определить массу элемента в наплавленном металле расчетным путем можно следующим образом.

С учетом поступления элемента  $\mathcal{E}_i$  из стержня, всех ферросплавов (общим количеством  $j$ ) и восстановленного металла из неметаллической части покрытия имеем:

$$m_{\mathcal{E}_i}^{\text{напл.}} = m_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст.}} \cdot \frac{\mathcal{E}_i^{\text{ст.}}}{100} + \sum_{k=1}^k m_{\mathcal{E}_i}^{\text{фер.}} \cdot \frac{\mathcal{E}_i^{\text{фер.}}}{100} + \sum_{j=1}^j m_j \cdot \frac{\mathcal{E}_i^j}{100} = m_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст.}} + m_{\mathcal{E}_i}^{\text{фер.}} + m_{\mathcal{E}_i}^{\text{шп.}}, \quad (2.7)$$

где  $m_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст.}}, m_{\mathcal{E}_i}^{\text{фер.}}, m_{\mathcal{E}_i}^{\text{шп.}}$  - массы элемента  $\mathcal{E}_i$  в электродном стержне, ферросплавах и восстановленная из неметаллических компонентов покрытия электрода, соответственно, кг.

Выразим все массы в правой части уравнения (2.7) через массу электрода  $m_{\text{эл.}}$ . Электрод состоит из стержня и покрытия, что количественно может быть выражено уравнением (2.8).

$$m_{\text{эл.}} = m_{\text{пок.}} + m_{\text{ст.}} \quad (2.8)$$

Соотношение между массами электродного стержня и покрытия определяется коэффициентом массы покрытия  $K_{\text{МП}}$  (2.9).

$$K_{\text{МП}} = \frac{m_{\text{пок.}}}{m_{\text{ст.}}} \quad (2.9)$$

Подставив уравнение (2.9) в (2.8) и решив его относительно массы стержня, получим:

$$m_{\text{ст.}} = \frac{m_{\text{эл.}}}{1 + K_{\text{МП}}} \quad (2.10)$$

В соответствии с уравнением (2.7), выразим массу каждого элемента, попадающего в расплав из стержня.

$$m_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}} = \frac{m_{\text{эл}}}{1 + K_{\text{МП}}} \cdot \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}}{100} \quad (2.11)$$

Выразим массу каждого ферросплава, содержащегося в покрытии через массу электрода.

$$m^{\text{фер}_k} = m_{\text{пок}} \cdot \frac{\% \text{фер}_k}{100} \quad (2.12)$$

С учетом выражений (2.8) и (2.9), а также наличия в покрытии сухого остатка жидкого стекла получаем:

$$m_{\text{пок}} = \frac{K_{\text{МП}}}{(1 + K_{\text{МП}}) \cdot (1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{100})} \cdot m_{\text{эл}}, \quad (2.13)$$

где  $\alpha$  - содержание связующего (жидкого стекла) в покрытии электрода, мас.%;

$\beta$  - массовая доля сухого остатка связующего, вычисленная по формуле (2.14):

$$\beta = 0,59 \cdot P + 0,028 \cdot m - 0,535, \quad (2.14)$$

где  $P$  – плотность связующего, г/см<sup>3</sup>;

$m$  – модуль связующего.

Произведем расчет массы элемента  $\mathcal{E}_i$ , образующейся при плавлении конкретного ферросплава в покрытии электрода.

$$m_{\mathcal{E}_i}^{\text{фер}_k} = \frac{K_{\text{МП}}}{(1 + K_{\text{МП}}) \cdot (1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{100})} \cdot m_{\text{эл}} \cdot \frac{\% \text{фер}_k}{100} \cdot \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} \quad (2.15)$$

Если данный элемент  $\mathcal{E}_i$  содержится в нескольких ферросплавах, то формула для расчета приобретает следующий вид (2.16):

$$m_{\mathcal{E}_i}^{\text{фер}} = \frac{m_{\text{эл}} \cdot K_{\text{МП}}}{(1 + K_{\text{МП}}) \cdot (1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{100})} \cdot \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \cdot \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} \quad (2.16)$$

Выразим массу каждого неметаллического компонента, содержащегося в покрытии, через массу электрода.

$$m^j = m_{\text{пок}} \cdot \frac{\%j}{100} \quad (2.17)$$

Компоненты электродного покрытия чаще всего представляют собой оксиды элементов. Поэтому для всех слагаемых (2.7), показывающих количество металлического компонента, перешедшего из покрытия, необходимо добавить множитель  $\frac{M_{\text{Э}_i}}{M_{\text{Э}_{in}O_m}}$ , то есть перейти от концентрации неметаллического вещества в покрытии в виде оксида элемента  $\text{Э}_{in}O_m$  к концентрации элемента  $\text{Э}_i$ .

Учитывая (2.13), произведем расчет массы элемента  $\text{Э}_i$ , образующегося при восстановлении из конкретного неметаллического компонента покрытия.

$$m_{\text{Э}_i}^j = \frac{m_{\text{эл}} \cdot K_{\text{МП}}}{(1 + K_{\text{МП}}) \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{100}\right)} \cdot \frac{\%j}{100} \cdot \frac{(\text{Э}_{in}O_m)_j}{100} \cdot \frac{M_{\text{Э}_i}}{M_{\text{Э}_{in}O_m}} \quad (2.18)$$

Если элемент  $\text{Э}_i$  содержится в нескольких неметаллических компонентах покрытия, то формула (2.18) приобретает следующий вид:

$$m_{\text{Э}_i}^{\text{шп}_j} = \frac{m_{\text{эл}} \cdot K_{\text{МП}}}{(1 + K_{\text{МП}}) \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{100}\right)} \cdot \sum_{k=1}^k \frac{\%j}{100} \cdot \frac{(\text{Э}_{in}O_m)_j}{100} \cdot \frac{M_{\text{Э}_i}}{M_{\text{Э}_{in}O_m}} \quad (2.19)$$

Учтем наличие сухого остатка жидкого стекла в покрытии следующим соотношением (2.20):

$$m_{\text{Э}_i}^{\text{жс}} = \frac{m_{\text{эл}} \cdot K_{\text{МП}}}{(1 + K_{\text{МП}}) \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{100}\right)} \cdot \frac{\alpha\beta}{100} \cdot \frac{(\text{Э}_{in}O_m)_{\text{жс}}}{100} \cdot \frac{M_{\text{Э}_i}}{M_{\text{Э}_{in}O_m}} \quad (2.20)$$

Таким образом, масса элемента  $\text{Э}_i$ , восстановленного из шлака, может быть определена по выражению:

$$m_{\text{Э}_i}^{\text{шп}} = m_{\text{Э}_i}^{\text{шп}_j} + m_{\text{Э}_i}^{\text{жс}} \quad (2.21)$$

$$m_{\text{Э}_i}^{\text{шп}} = \frac{m_{\text{эл}} \cdot K_{\text{МП}}}{(1 + K_{\text{МП}}) \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{100}\right)} \cdot \frac{M_{\text{Э}_i}}{M_{\text{Э}_{in}O_m}} \cdot \left( \sum_{k=1}^k \frac{\%j}{100} \cdot \frac{(\text{Э}_{in}O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \cdot \frac{(\text{Э}_{in}O_m)_{\text{жс}}}{100} \right) \quad (2.22)$$

Выражая в уравнении (2.7) все массы через массу электрода и проведя соответствующие преобразования, получим:

$$m_{\mathcal{E}_i} = \frac{m_{\mathcal{E}L}}{1 + K_{\text{МП}}} \times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{СТ}}}{100} + \frac{K_{\text{МП}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} + \left[ \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_{\text{СВ}}}{100} \right] \cdot \frac{M_{\mathcal{E}_i}}{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}} \right) \right\} \quad (2.23)$$

Включив в уравнение (2.23) величины  $K_1^{\mathcal{E}_i}$ ,  $K_2^{\mathcal{E}_i}$  и  $K_3^{\mathcal{E}_i}$ , выведем выражение для расчета массы компонента  $\mathcal{E}_i$  в металлической ванне (2.24):

$$m_{\mathcal{E}_i} = \frac{m_{\mathcal{E}L}}{1 + K_{\text{МП}}} \times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{СТ}}}{100} (1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + \frac{K_{\text{МП}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} (1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + \left[ \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_{\text{СВ}}}{100} \right] \frac{M_{\mathcal{E}_i}}{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}} K_3^{\mathcal{E}_i} \right) \right\} \quad (2.24)$$

Аналогично уравнению (2.24) получили выражение для расчета массы оксида компонента  $\mathcal{E}_i$  в шлаковой ванне. Это выражение будет иметь вид:

$$m_{\mathcal{E}_{in} O_m} = \frac{m_{\mathcal{E}L}}{1 + K_{\text{МП}}} \times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{СТ}}}{100} \frac{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}}{M_{\mathcal{E}_i}} K_2^{\mathcal{E}_i} + \frac{K_{\text{МП}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} \frac{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}}{M_{\mathcal{E}_i}} K_1^{\mathcal{E}_i} + \left[ \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_{\text{СВ}}}{100} \right] \cdot (1 - K_3^{\mathcal{E}_i}) \right) \right\} \quad (2.25)$$

Согласно разработанной физической модели, потери на испарение и разбрызгивание по отдельности учесть достаточно сложно. Однако, суммарная величина таких потерь известна и колеблется в пределах 5-20 %. Кроме того, значительную долю массы покрытия составляют вещества, при нагревании и разложении которых выделяется углекислый газ, что не изменяет массу образующейся шлаковой ванны. Суммарные потери на испарение, разбрызгивание и удаление углекислого газа учтем введением коэффициентов потерь металлических и неметаллических компонентов сварочного электрода:  $K_{\text{пот}}^{\text{МЕ}}$  и  $K_{\text{пот}}^{\text{ШП}}$ .

Объединив (2.5), (2.24) и (2.25) в систему уравнений с тремя неизвестными, появляется возможность определить парциальные коэффициенты перехода:



$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\eta}_{\mathcal{E}_i} &= a\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}} + b\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ф}} + c\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + b(1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + c \cdot K_3^{\mathcal{E}_i}, & (2.26) \\ m_{\mathcal{E}_i} &= \frac{m_{\mathcal{E}_i}^{\text{эл}}(1 - K_{\text{пот}}^{\text{ме}})}{1 + K_{\text{МП}}} \times \\ & \times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}}{100} (1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + \frac{K_{\text{МП}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} (1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + \left[ \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in}O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in}O_m)_{\text{СВ}}}{100} \right] \frac{M_{\mathcal{E}_i}}{M_{\mathcal{E}_{in}O_m}} K_3^{\mathcal{E}_i} \right) \right\} \\ m_{\mathcal{E}_{in}O_m} &= m_{\mathcal{E}_i}^{\text{эл}} \frac{1 - K_{\text{пот}}^{\text{шл}}}{1 + K_{\text{МП}}} \times \\ & \times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}}{100} \frac{M_{\mathcal{E}_{in}O_m}}{M_{\mathcal{E}_i}} K_2^{\mathcal{E}_i} + \frac{K_{\text{МП}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} \frac{M_{\mathcal{E}_{in}O_m}}{M_{\mathcal{E}_i}} K_1^{\mathcal{E}_i} + \left( \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in}O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in}O_m)_{\text{СВ}}}{100} \right) (1 - K_3^{\mathcal{E}_i}) \right) \right\} \end{aligned} \right.$$

где  $m_{\mathcal{E}_i}$  – масса элемента  $\mathcal{E}_i$  в металлической ванне, кг;  $m_{\text{эл}}$  – масса расплавленного электрода, кг;  $K_{\text{пот}}^{\text{ме}}$ ,  $K_{\text{пот}}^{\text{шл}}$  – коэффициенты потерь металлических и неметаллических компонентов сварочного электрода, соответственно;  $K_{\text{МП}}$  – коэффициента массы покрытия;  $[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}$  – концентрация компонента  $\mathcal{E}_i$  в стержне электрода, мас.%;  $\% \text{фер}_k$  – концентрация ферросплава  $k$  в покрытии электрода, мас.%;  $[\mathcal{E}_i]_k$  – концентрация компонента  $\mathcal{E}_i$  в ферросплаве  $k$ , мас.%;  $\% j$  – концентрация минерала  $j$  в покрытии электрода, мас.%;  $(\mathcal{E}_{in}O_m)_j$  – концентрация оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$  в минерале  $j$ , мас.%;  $(\mathcal{E}_{in}O_m)_{\text{СВ}}$  – концентрация оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$  в жидком стекле, мас.%;  $M_{\mathcal{E}_i}$  – атомная масса элемента  $\mathcal{E}_i$ , кг/моль;  $M_{\mathcal{E}_{in}O_m}$  – молекулярная масса оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$ , кг/моль;  $m_{\mathcal{E}_{in}O_m}$  – масса оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$  в шлаке, кг;  $\alpha$  – содержание связующего (жидкого стекла) в покрытии электрода, мас.%;  $\beta$  – массовая доля сухого остатка связующего.

Анализ системы уравнений (2.26) показывает, что для ее решения кроме справочных данных, необходимо определение отдельных величин из специально поставленных экспериментов.

В соответствии с табл. 2.1 ряд величин определяется расчетным путем по экспериментальным данным. Приведем уравнения для нахождения этих величин.

Таблица 2.1 – Способы определения величин, входящих в систему уравнений (2.26)

Наименование величины	Обозначение величины	Способ определения
1	2	3
Усредненный коэффициент перехода элемента $\mathcal{E}_i$	$\bar{\eta}_{\mathcal{E}_i}$	Расчет по экспериментальным данным
Доля участия ферросплавов в формировании наплавленного металла	$a$	Расчет по экспериментальным данным
Доля участия электродного стержня в формировании наплавленного металла	$b$	Расчет по экспериментальным данным
Доля участия восстановленного из шлака металла в формировании наплавленного металла	$c$	Расчет по экспериментальным данным
Парциальный коэффициент перехода элемента $\mathcal{E}_i$ в наплавленный металл из стержня	$\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}}$	Расчет (2.26)
Парциальный коэффициент перехода элемента $\mathcal{E}_i$ в наплавленный металл из ферросплавов	$\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ф}}$	Расчет (2.26)
Парциальный коэффициент перехода элемента $\mathcal{E}_i$ в наплавленный металл из шлака	$\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}}$	Расчет (2.26)
Доля массы компонента $\mathcal{E}_i$ металлической части покрытия электрода, окисляемой газом и шлаком	$K_1^{\mathcal{E}_i}$	Расчет (2.26)
Доля массы компонента $\mathcal{E}_i$ металла стержня, окисленной газом и шлаком	$K_2^{\mathcal{E}_i}$	Расчет (2.26)
Доля массы оксида компонента $\mathcal{E}_i$ неметаллической части покрытия, переходящей в металл в результате реакций восстановления на стадии капли	$K_3^{\mathcal{E}_i}$	Расчет (2.26)
Масса элемента $\mathcal{E}_i$ в металлической ванне, кг	$m_{\mathcal{E}_i}$	Расчет по экспериментальным данным
Масса расплавленного электрода, кг	$m_{\text{эл}}$	Эксперимент
Коэффициент потерь металлических компонентов сварочного электрода	$K_{\text{пот}}^{\text{ме}}$	Расчет по экспериментальным данным
Коэффициент массы покрытия	$K_{\text{МП}}$	Справочные данные
Концентрация компонента $\mathcal{E}_i$ в стержне электрода, мас. %	$[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}$	Эксперимент
Содержание связующего (жидкого стекла) в покрытии электрода	$\alpha$	Справочные данные
Массовая доля сухого остатка связующего	$\beta$	Справочные данные
Концентрация ферросплава $k$ в покрытии электрода, мас. %	%фер $_k$	Справочные данные
Концентрация компонента $\mathcal{E}_i$ в ферросплаве $k$ , мас. %	$[\mathcal{E}_i]_k$	Справочные данные
Концентрация минерала $j$ в покрытии электрода, мас. %	% $j$	Справочные данные
Концентрация оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$ в минерале $j$ , мас. %	$(\mathcal{E}_{in}O_m)_j$	Справочные данные

1	2	3
Концентрация оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$ в жидком стекле, мас. %	$(\mathcal{E}_{in}O_m)_{CB}$	Справочные данные
Атомная масса элемента $\mathcal{E}_i$ , кг/моль	$M_{\mathcal{E}_i}$	Справочные данные
Молекулярная масса оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$ , кг/моль	$M_{\mathcal{E}_{in}O_m}$	Справочные данные
Масса оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$ в шлаке, кг	$m_{\mathcal{E}_{in}O_m}$	Расчет по экспериментальным данным
Коэффициент потерь неметаллических компонентов сварочного электрода	$K_{пот}^{шп}$	Расчет по экспериментальным данным

Для нахождения усредненного коэффициента перехода элемента  $\mathcal{E}_i$ , выразим его через концентрации:

$$\bar{\eta}_{\mathcal{E}_i} = \frac{[\mathcal{E}_i]_{н.м.}}{a \cdot [\mathcal{E}_i]_{фер} + b \cdot [\mathcal{E}_i]_{ст} + c \cdot [\mathcal{E}_i]_{ш}} \quad (2.27)$$

где  $[\mathcal{E}_i]_{н.м.}$  - концентрация элемента  $\mathcal{E}_i$  в наплавленном металле по результатам химического анализа, мас.%;  $[\mathcal{E}_i]_{ст}$  - исходная концентрация элемента  $\mathcal{E}_i$  в стержне электрода, мас.%;  $[\mathcal{E}_i]_{фер}$  - исходная концентрация элемента  $\mathcal{E}_i$  в ферросплавах электродного покрытия, мас.%;  $[\mathcal{E}_i]_{ш}$  - концентрации элемента  $\mathcal{E}_i$  при полном восстановлении оксида элемента  $\mathcal{E}_{in}O_m$ .

Воспользуемся известным выражением для определения доли участия основного металла в металле шва:

$$\gamma_{осн} = \frac{m_{осн.ме}}{m_{шва}} \quad (2.28)$$

Считая, что  $m^{св.ванны} = m^{шва}$ , получим

$$\gamma_{осн} = \frac{m_{осн.ме}}{m_{св.ванны}} \quad (2.29)$$

По идентичности сделаем вывод, что

$$a = \frac{m_{ст}}{m_{св.ванны}} \quad (2.30)$$

Учитывая потери металла на испарение и разбрызгивание, а также выражение (2.10), получим:

$$a = \frac{m_{эл} \cdot (1 - K_{пот}^{ме})}{m_{св.ванны} \cdot (1 + K_{МП})} \quad (2.31)$$

Приведем выражения для определения величин  $b$  и  $c$ :

$$b = \frac{m_{\text{ЭЛ}} \cdot (1 - K_{\text{пот}}^{\text{ме}}) \cdot K_{\text{МП}} \cdot \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{ фер}_k}{100}}{m_{\text{св.ванны}} \cdot (1 + K_{\text{МП}}) \cdot \left(1 + \frac{\alpha\beta}{100}\right)} \quad (2.32)$$

$$c = 1 - a - b \quad (2.33)$$

Массы компонентов в металлической (сварочной) и шлаковой ваннах определяем следующим образом.

$$m_{\text{Э}_i} = \frac{m_{\text{св.ванны}} \cdot [\text{Э}_i]_{\text{распл}}}{100} \quad (2.34)$$

$$m_{\text{Э}_{in}O_m} = \frac{m_{\text{шлак.ванны}} \cdot (\text{Э}_{in}O_m)_{\text{распл}}}{100} \quad (2.35)$$

где  $m_{\text{св.ванны}}$  – масса сварочной (металлической) ванны, кг;  $[\text{Э}_i]_{\text{распл}}$  – концентрация компонента  $\text{Э}_i$  в сварочной ванне, мас.%;  $m_{\text{шлак.ванны}}$  – масса шлаковой ванны, кг;  $(\text{Э}_{in}O_m)_{\text{распл}}$  – концентрация оксида  $\text{Э}_{in}O_m$  в шлаковой ванне, мас.%

Коэффициент потерь металла при сварке (наплавке) покрытыми электродами определяли по следующему уравнению:

$$K_{\text{пот}}^{\text{ме}} = \frac{m_{\text{ст}} + m_{\text{фер}} + m_{\text{ме}}^{\text{шл}} - m_{\text{напл.ме}}}{m_{\text{ст}} + m_{\text{фер}} + m_{\text{ме}}^{\text{шл}}} \quad (2.36)$$

где  $m_{\text{ме}}^{\text{шл}}$  – масса металла, восстановленного из шлака и перешедшего в сварочную ванну, кг.

Коэффициент потерь шлака при сварке (наплавке) покрытыми электродами определяли по уравнению (2.37):

$$K_{\text{пот}}^{\text{шл}} = \frac{m_{\text{шл}} - m_{\text{шл}}^{\text{эсп}}}{m_{\text{шл}}} \quad (2.37)$$

где  $m_{\text{шл}}$  – масса шлака, образовавшегося при плавлении 100 г электрода, полученная расчетным путем (2.38), кг;

$m_{\text{шл}}^{\text{эсп}}$  – масса шлака, образовавшегося при плавлении 100 г электрода, полученная из эксперимента, кг.

$$m_{\text{шв}} = m_{\text{пок}} - m_{\text{фер}} - m_{\text{газ}} + m_{\text{окс}}, \quad (2.38)$$

где  $m_{\text{пок}}$  - масса покрытия, кг;

$m_{\text{фер}}$  - масса ферросплавов в покрытии электрода, кг;

$m_{\text{газ}}$  - масса газообразных продуктов, образовавшихся при диссоциации и испарении компонентов покрытия электрода, кг;

$m_{\text{окс}}$  - масса оксидов, образовавшихся при окислении компонентов электродного стержня и ферросплавов покрытия электрода, кг.

Таким образом, уравнения (2.26), (2.27), (2.31) – (2.38) представляют собой математическую модель процесса формирования состава наплавленного металла при использовании покрытых сварочных электродов. При ее решении, на основании справочных и экспериментальных данных, могут быть рассчитаны для каждого элемента, входящего в состав наплавленного металла, усредненный и парциальные коэффициенты перехода.

Данные уравнения позволяют определить те величины, которые необходимо найти из экспериментов. Эта информация будет положена в основу разработки методики проведения экспериментов и обработки их результатов (глава 3).

Процессы формирования металла шва при ручной дуговой сварке и сварке порошковой проволокой достаточно близки [108 - 110]. Это позволило распространить описанную методику разработки математической модели физико-химических процессов на сварку порошковой проволокой (Приложение А) [103, 111].

### **2.2.2 Математическая модель формирования состава металла шва**

Из физической модели процесса сварки покрытыми электродами выделим второй этап – формирование состава металла шва, для которого разработаем математическую модель.

Сварной шов формируется (рис. 2.1) смешением наплавленного и основного металла (2.39).

$$[\mathcal{E}_i]_{\text{ШОВ}} = [\mathcal{E}_i]_{\text{О.М.}} \cdot \gamma_{\text{О.М.}} \cdot \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{О.М.}} + [\mathcal{E}_i]_{\text{Н.М.}} \cdot \gamma_{\text{Н.М.}} \quad (2.39)$$

где  $[\mathcal{E}_i]_{\text{ШОВ}}$  - концентрации элемента  $\mathcal{E}_i$  в металле шва при однослойной наплавке по результатам химического анализа, мас.%;  $[\mathcal{E}_i]_{\text{О.М.}}$  - концентрации элемента  $\mathcal{E}_i$  в основном металле по результатам химического анализа, мас.%;  $[\mathcal{E}_i]_{\text{Н.М.}}$  - концентрации элемента  $\mathcal{E}_i$  в наплавленном металле по результатам химического анализа, мас.%;  $\gamma_{\text{О.М.}}$  - доля участия основного металла в металле шва;  $\gamma_{\text{Н.М.}}$  - доля участия наплавленного металла в металле шва, при этом  $\gamma_{\text{О.М.}} + \gamma_{\text{Н.М.}} = 1$ ;  $\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{О.М.}}$  - парциальный коэффициент перехода элемента  $\mathcal{E}_i$  из основного металла в металл шва.

Тогда получим (2.40):

$$\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{О.М.}} = \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ШОВ}} - [\mathcal{E}_i]_{\text{Н.М.}} \cdot \gamma_{\text{Н.М.}}}{[\mathcal{E}_i]_{\text{О.М.}} \cdot \gamma_{\text{О.М.}}} \quad (2.40)$$

Выражение (2.41) позволяет оценить усредненный коэффициент перехода элемента  $\mathcal{E}_i$  в металл шва при ручной дуговой сварке покрытыми электродами.

$$\bar{\eta}_{\mathcal{E}_i}^{\text{ШОВ}} = \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ШОВ}}}{[\mathcal{E}_i]_{\text{Н.М.}} \cdot \gamma_{\text{Н.М.}} + [\mathcal{E}_i]_{\text{О.М.}} \cdot \gamma_{\text{О.М.}}} \quad (2.41)$$

Предложенная методика позволяет оценить состав металла шва при сварке покрытыми электродами и коэффициенты перехода элементов.

### 2.3 Оценка адекватности математической модели

Проверка адекватности модели обычно преследует две цели:

- оценить реалистичность принятых при моделировании гипотез;
- оценить точность полученных результатов и их соответствие решаемым задачам [1].

По приведенным формулам (2.23), (2.27) и (2.34) был сделан расчет для 10 марок электродов с различным типом покрытия.

Расчет производился по имеющимся справочным данным (ТУ на изготовление электродов, ГОСТы) и данным экспериментов. Составы проволоки

и основного металла также принимались по средним значениям из ГОСТов.

Для обеспечения единообразных условий расчетов приняли массу расплавленного электрода ( $m_{эл}$ ) равную 100 г.

Результаты расчетов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Коэффициенты перехода элементов\*  $\bar{\eta}_{Э_i}$

Марка электрода	Ø ст.	K <sub>МП</sub>	Коэффициенты перехода				
			$\bar{\eta}_C$	$\bar{\eta}_{Si}$	$\bar{\eta}_{Mn}$	$\bar{\eta}_S$	$\bar{\eta}_P$
Рутиловое покрытие							
MP-3	3	0,43	<u>0,78</u> 0,63	<u>0,74</u> 0,94	<u>0,12</u> 0,106	<u>0,9</u> 0,513	<u>0,86</u> 0,65
	4	0,40	<u>0,79</u> 0,68	<u>0,78</u> 0,85	<u>0,13</u> 0,13	<u>0,9</u> 0,375	<u>0,99</u> 0,75
	5	0,38	0,92	0,98	0,15	0,88	1
	6	0,39	0,92	1	0,16	0,88	1
ОЗС-4	3	0,35	<u>0,61</u> 0,35	<u>0,95</u> 1	<u>0,16</u> 0,14	<u>1</u> 0,36	<u>1</u> 0,63
	4	0,40	<u>0,57</u> 0,35	<u>0,86</u> 0,97	<u>0,14</u> 0,12	<u>1</u> 0,41	<u>1</u> 0,6
	5	0,44	0,54	0,79	0,13	1	1
АНО-19МН	4	0,70	0,86	2	0,24	1	1
Основное покрытие							
НИИ-48	3	0,22	1	0,49	0,87	1	1
	4	0,27	1	0,35	0,85	1	0,98
	5	0,32	1	0,35	0,83	1	1
ДС-1	3	0,30	0,76	0,2	0,53	1	1
	4	0,27	0,76	0,23	0,58	1	1
	5	0,25	0,77	0,24	0,61	1	1
ОЗС-5	3	0,48	1	0,33	0,47	1	1
	4	0,48	1	0,33	0,47	1	1
	5	0,48	1	0,33	0,47	1	1
УОНИ 13-55	2	0,39	0,95	0,32	0,46	0,98	1
	2,5	0,36	0,95	0,35	0,49	0,98	1
	3	0,30	<u>0,96</u> 0,8	<u>0,41</u> 0,5	<u>0,55</u> 0,6	<u>0,20</u> 0,2	<u>0,75</u> 0,75
	4	0,33	<u>0,95</u> 0,76	<u>0,37</u> 0,49	<u>0,52</u> 0,64	<u>0,34</u> 0,33	<u>0,84</u> 0,84
	5	0,32	0,96	0,38	0,53	0,33	0,85
ЦУ-7	2	0,47	0,56	0,23	0,42	1	1
	3	0,45	0,56	0,23	0,44	1	1
	4	0,43	0,57	0,24	0,45	1	1
	5	0,42	0,57	0,25	0,46	1	1
6	0,40	0,58	0,26	0,48	1	1	
ОЛН-10С	3	0,32	0,46	0,15	0,29	-	-
ОЛН-10С1	3	0,31	0,59	0,64	0,60	-	-

Ильменитовое покрытие							
ОЗС-21	3	0,39	0,44	0,44	0,09	1	0,91
	4	0,32	0,49	0,51	0,1	1	0,92
	5	0,30	0,50	0,54	0,11	1	0,93
	6	0,36	0,46	0,47	0,09	1	0,91

\* в числителе приведен расчет по справочным данным, в знаменателе – по экспериментальным данным

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает их достаточное согласие. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными (табл. 2.2.) составляет в среднем 15 %, что сопоставимо с ошибкой эксперимента и является достаточным для подобного типа моделей [1]. Проверка результатов моделирования на непротиворечивость, устойчивость и реалистичность, в основном, показывает их соответствие принятым гипотезам и возможность применения модели для оценки коэффициентов перехода элементов в наплавленный металл в диапазоне концентраций, характерном для низкоуглеродистых низколегированных сталей. Таким образом, можно заключить, что разработанная математическая модель позволяет получить адекватные результаты.

Выводы по главе 2:

1. Разработана физическая модель ручной дуговой сварки покрытыми электродами, которая показывает структуру процесса, взаимодействие и перенос компонентов, а также формирование металлической и шлаковой ванн.
2. Разработаны математические модели процесса формирования состава наплавленного металла и металла сварного шва при использовании покрытых сварочных электродов.
3. Установлена адекватность разработанных физической и математической моделей, на основе сравнения усредненных коэффициентов перехода элементов, найденных по расчетным и экспериментальным данным.
4. Составлен перечень величин и источники их определения, входящие в уравнения математической модели, что является предпосылкой для разработки методики проведения экспериментов и обработки их результатов.



### **ГЛАВА 3 РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕХОДА ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ**

Разработанная в главе 2 математическая модель процессов взаимодействия фаз при ручной дуговой сварке покрытыми электродами требует знания определенных величин, которые должны быть найдены из экспериментов (табл.2.1). Кроме того, полученные уравнения позволяют определить значения усредненного и парциальных коэффициентов перехода конкретного элемента, а также установить их зависимость от параметров режима сварки (наплавки).

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны электроды двух типов покрытия – основного и рутилового. Выбранные типы покрытий отличаются активностью и составом шлака, что является важным для установления зависимостей. Для каждого типа покрытия были выбраны марки, которые являются наиболее применяемыми в промышленности. А именно: для электродов с основным типом покрытия – УОНИ 13/45 и УОНИ 13/55; для рутиловых – МР-3.

#### **3.1 Разработка методики проведения экспериментов**

Задачей любого эксперимента является получение определенного набора данных, которые должны быть достоверными и иметь необходимую точность. Для того, чтобы эти данные были достоверными, необходимо учесть все сопутствующие факторы: особенности материалов, правильный подбор оборудования для установки, разработка методики проведения экспериментов, обработку их результатов.

Под методикой проведения эксперимента будем понимать набор инструкций по проведению эксперимента, в которых указываются характер и величина изменений переменных, а также последовательность выполнения работ [112].

Для применения разработанной математической модели была предложена методика проведения экспериментов, основные элементы которой оказывают существенное влияние на получаемые результаты:

- величины, которые будут определяться в ходе эксперимента и необходимые для этого приборы;
- диапазон электрических параметров;
- описание экспериментальной установки;
- описание характеристик измерительной техники;
- количество слоев наплавленного металла;
- методы подготовки проб для анализа металла и шлака;
- методы анализа металла и шлака.

Остановимся подробно на каждом элементе методики эксперимента.

### 3.1.1 Величины, определяемые в ходе эксперимента

Метод полного материального баланса, положенный в основу разработанной математической модели, предполагает знание масс металлической и шлаковой ванн, концентраций компонентов в металле и шлаке, характеристики электродов и технологические параметры.

К характеристикам электродов отнесем следующие: марка электродной проволоки, состав электродного покрытия, коэффициент массы покрытия.

Основные технологические параметры: сварочный ток, напряжение, время сварки (наплавки), количество слоев наплавленного металла.

Исходя из этих условий, представим в таблице 3.1 измеряемые величины и приборы для их измерения.

Таблица 3.1 - Изменяемые величины и приборы для их измерения

Изменяемая величина	Прибор для ее измерения
Масса электрода, г	Электронные весы
Масса пластины, г	Электронные весы
Длина электрода, см	Линейка металлическая
Длина свободного конца электрода, см	Линейка металлическая

Сварочный ток, А	Амперметр
Напряжение, В	Вольтметр
Время сварки, с	Секундомер
Масса пластины после наплавки, г	Электронные весы
Масса пластины без брызг, г	Электронные весы
Масса пластины без шлака, г	Электронные весы
Масса огарка электрода, г	Электронные весы
Масса стержня огарка, г	Электронные весы
Длина огарка, см	Линейка металлическая
Масса пластины с 5 валиками, г	Электронные весы

### 3.1.2 Диапазон электрических параметров

Область исследуемых значений сварочного тока определяется рекомендованными в ТУ на изготовление электродов режимами.

Для проведения экспериментов из диапазона рекомендованных значений сварочного тока были выбраны три значения тока: минимальный, максимальный и средний из диапазона, рассчитываемый по формуле (3.1):

$$I_{\text{св}}^{\text{ср}} = \frac{I_{\text{св}}^{\text{max}} + I_{\text{св}}^{\text{min}}}{2}, \quad (3.1)$$

где  $I_{\text{св}}^{\text{ср}}$  - среднее значение сварочного тока из рекомендованного диапазона, А;

$I_{\text{св}}^{\text{max}}, I_{\text{св}}^{\text{min}}$  - максимальное и минимальное значения сварочного тока из рекомендованного диапазона, соответственно, А.

Варьирование величины можно осуществлять последовательно, так как это не окажет существенного влияния на получаемые характеристики [112].

Такой подход к выбору варьируемых факторов позволяет обеспечить адекватность результатов, установление зависимости от режимов и предотвратить удорожание эксперимента [112].

### 3.1.3 Описание экспериментальной установки

Установка должна обеспечивать:

- постоянный ток;

- варьирование, установление и поддержание параметров режима на заданном уровне;
- измерение сварочного тока и напряжения;
- равномерное продольное перемещение электрода, обеспечивающее постоянную скорость наплавки;
- равномерную подачу электрода в зону сварки (наплавки).

В соответствии с этими требованиями было выбрано следующее оборудование, из которого была скомпонована экспериментальная установка (рис. 3.1):

- источник питания Штурм Lorch X350;
- измерительный блок БИ-01 (Selma);
- механизм перемещения Noboruder NB-2SV

### 3.1.4 Характеристика оборудования и измерительной техники

Источник питания Штурм Lorch X350 предназначен для дуговой сварки постоянным током углеродистой, низколегированной и высоколегированной стали, а также цветных металлов и сплавов. Может применяться для дуговой сварки покрытыми электродами и TIG сварки. В комбинации с механизмом подачи проволоки аппарат может использоваться для MIG/MAG сварки.

Технические характеристики аппарата приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики источника питания Штурм Lorch X350

Технические характеристики	Единица измерения	Величина
Мин./макс. диапазон параметра режима	А	10 - 350
	В	20,4 - 34
Регулировка тока		плавная
Диаметр электродов	мм	1,5 – 8,0

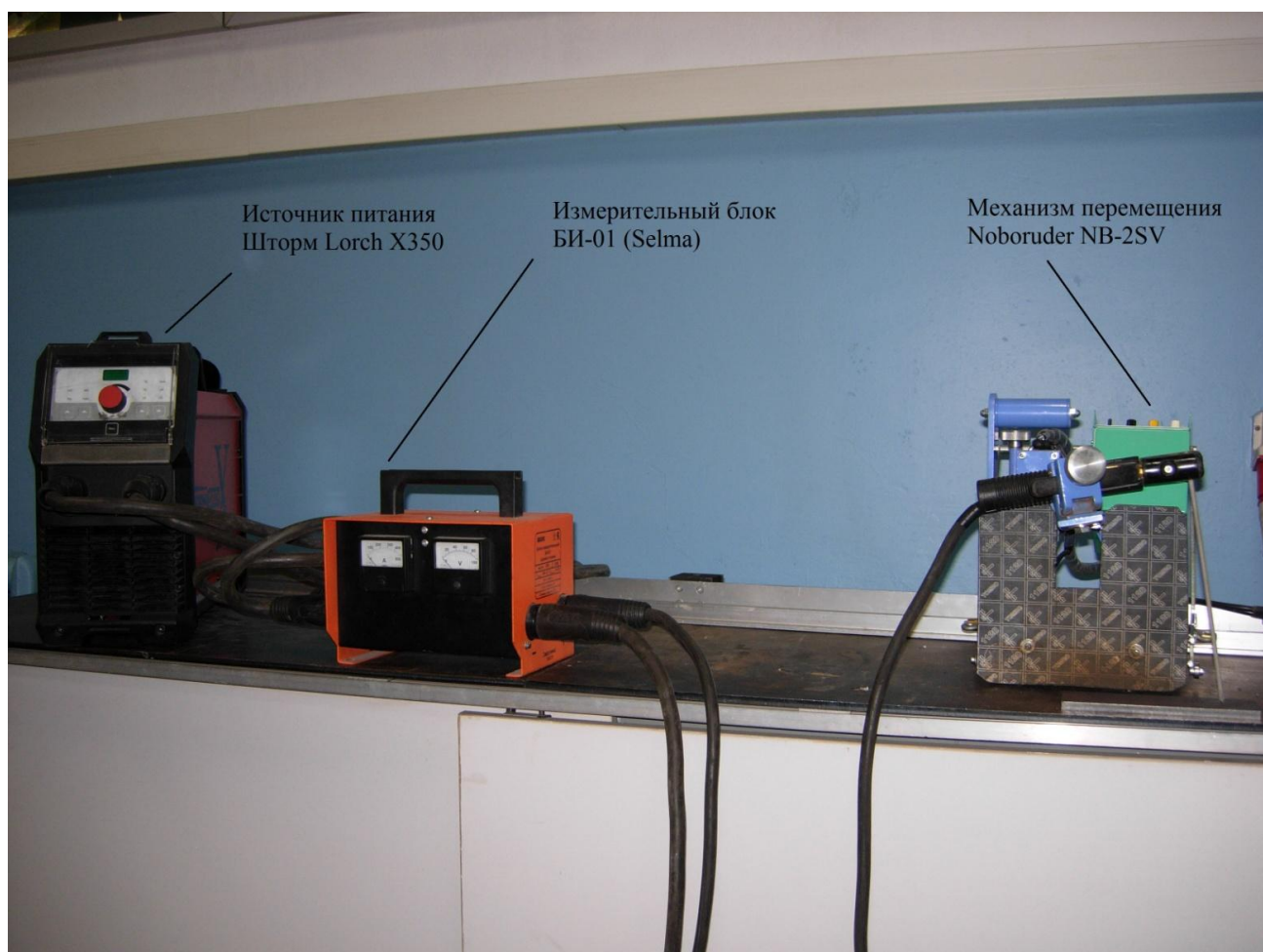


Рисунок 3.1 – Состав установки для проведения эксперимента

Блок измерительный БИ-01 предназначен для измерения сварочного тока и напряжения на рабочем месте сварщика. Основные технические данные блока приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Технические данные блока БИ-01

Параметры измерительных приборов	Значения
Амперметр М2001, кл.2,5	
Предел показаний сварочного тока, А	0 - 500
Пределы измерения сварочного тока, А	10 - 500
Вольтметр М42300, кл.1,5	
Пределы показаний сварочного напряжения, В	0 - 100
Пределы измерения сварочного напряжения, В	5 - 100
Максимальная удаленность сварочного поста от источника, м	30

Самоходная тележка NB-2SV предназначена для перемещения приспособлений при сварке стыковых сварных швов в горизонтальном и вертикальном положении. Направляющая рейка гарантирует стабильную скорость прямолинейного перемещения тележки.

Технические характеристики самоходной тележки NB-2SV обеспечивают проведение экспериментов:

- Скорость аппарата: 50 ~ 550 мм/мин.
- Блок автоматической остановки: автоматическая остановка с помощью магнита
- Максимальный сварочных ток 350А.

Лабораторные электронные весы CAS MWP-3000 предназначены для статических измерений массы образцов в научно-исследовательских лабораториях. Тензометрический метод измерений обеспечивает высокую точность показаний.

Устройство весов обеспечивает простую калибровку в режиме пользователя, учет массы тары, тарирование во всем диапазоне взвешиваний, подключение к компьютеру через интерфейс RS-232C. Платформа весов выполнена из нержавеющей стали.

Технические характеристики весов CAS MWP-3000:

- наибольший предел взвешивания - 3000 г;
- наименьший предел взвешивания - 5 г;
- цена поверенного деления и дискретность отсчета - 0,1 г;
- класс точности - II по ГОСТ 24104-01;
- дисплей жидкокристаллический с подсветкой;
- количество разрядов индикатора - 6;
- диапазон рабочих температур - от -10 °С до +40 °С.

Спектрометр атомно-абсорбционный «КВАНТ-2А» предназначен для измерения массовой концентрации элементов в продукции химической, нефтехимической и металлургической промышленности (табл.3.4).

Таблица 3.4 – Технические характеристики спектрометра «КВАНТ-2А»

Спектральный диапазон (нм)	185..860
Диапазон показаний оптической плотности (Б)	0..3
Диапазон измерения оптической плотности (Б)	0,1...0,75
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения оптической плотности, %	±1,0
Коэффициент подавления фонового поглощения	0,003..0,01

**Фотометр КФК-2** — базовая версия фотоэлектрического концентрационного колориметра. Прибор позволяет проводить измерения коэффициентов пропускания и оптической плотности растворов и твердых тел, определять концентрации вещества в растворах в участке диапазона длин волн, соответствующему видимому свету (табл.3.5).

Таблица 3.5 - Технические характеристики фотометра КФК-2А

Спектральный диапазон, нм	315...980
Пределы измерения коэффициента пропускания	1...100
Пределы измерения оптической плотности	0...2
Погрешность по пропусканию, %	±1
Дополнительная погрешность, %	0,3
Основная абсолютная погрешность измерения $t$ , %	не более 0,3

Спектрометр SPECTROMAXx (табл.3.6) позволяет определить содержание всех химических элементов, нормируемых в металлургии. Спектрометр SPECTROMAXx внесен в Государственный Реестр РФ под № 13358-12 и является стандартизованным средством измерения на территории России.

Таблица 3.6 – Основные технические характеристики спектрометра SPECTROMAXx

Диапазон измеряемых концентраций элементов (примесей) в металлах и сплавах, %	От 0 до 99,9
Пределы обнаружения спектрометра, %	0,00001 — 0,005
Оптический диапазон длин волн, нм	140-670
Предел допускаемого относительного среднего квадратического отклонения результата измерений выходного сигнала, %	1,0
Относительная погрешность измерений концентрации элементов (при концентрации не менее 0,5 %), %	± 10,0

### 3.1.5 Обоснование числа слоев наплавленного металла

Для определения парциальных коэффициентов перехода элементов из электрода в наплавленный металл по методу полного материального баланса необходимо знание химического состава чистого наплавленного металла (без влияния основного металла). Данные, приведенные в ГОСТе или ТУ на изготовление электродов использовать нельзя, так как там приводится широкий диапазон значений концентрации элементов.

Согласно ГОСТ 9466-75 для проверки химического состава наплавленного металла на пластине из стали марки, для сварки которой предназначены электроды, выполняют пятислойную наплавку.

Для учета взаимодействия наплавленного металла с основным при сварке также необходимо выполнить однослойную наплавку.

### 3.1.6 Методы подготовки проб для анализа металла и шлака

Условия отбора пробы должны удовлетворять требованиям ее представительности. Проба – это лишь некоторая часть исследуемого объекта, используемая в дальнейшем для измерения. Под представительностью пробы понимается соответствие среднего результата измерения истинному значению измеряемого свойства всего объекта исследования. Представительность пробы должна определяться той степенью достоверности, с которой делается заключение о свойстве объекта в целом на основании изучения части системы [113].

Представительность пробы определяется в основном тремя факторами:

- относительными размерами пробы, как части системы;
- степенью неоднородности исследуемого свойства системы;
- воспроизводимостью метода исследования [113].

Размеры пробы и место пробоотбора для нашего случая регламентируются ГОСТ 7122-81 и ГОСТ 9466-75.



Пробу следует отбирать из металла, специально наплавленного на образцы. Проба отбирается из любой части сварных швов или наплавленного металла по их длине, исключая неиспользуемые начальные и конечные участки сварных швов или наплавленного металла образцов. При этом длина неиспользуемого участка шва в начале и конце наплавки при ручной дуговой сварке составляет 20 мм при длине шва не менее 150 мм.

Согласно упрощениям и допущениям, обозначенным в п 2.2 настоящей работы, металлическая и шлаковая ванны являются реакторами идеального смешения, то есть химический состав металла шва и шлака признается однородным во всем объеме.

Особое место в плане исследований занимает пробоподготовка. Именно от тщательности и идентичности выполнения операций пробоподготовки зависит точность полученных результатов.

Согласно ГОСТ 7122-81 и ГОСТ 18895-97 анализируемая поверхность пробы для спектрального анализа должна быть обработана точением, строганием или фрезерованием. Шероховатость поверхности должна быть 80 мкм по ГОСТ 2789-73.

Для определения доли участия основного металла провели макроисследование шлифа. Для этого шлиф после обработки фрезерованием подвергли шлифованию на наждачном круге с постепенно увеличивающейся зернистостью бумаги.

Важными элементами пробоподготовки шлаковых проб являются дробление и измельчение. Эти операции проводили в агатовой ступке. Идентичность фракционного состава определяли с помощью сит с размером 0,05 мм и 0,03 мм. Затем для исключения металлических частиц проводили отмагничивание проб.

### **3.1.7 Методы анализа металла и шлака**

Для оценки химического состава наплавленного металла и металла шва

использован фотоэлектрический спектральный анализ.

Фотоэлектрический спектральный анализ выполняется по ГОСТ 18895-97. Метод основан на возбуждении атомов элементов стали электрическим разрядом, разложении в спектр, измерении аналитических сигналов, пропорциональных интенсивности или логарифму интенсивности спектральных линий, и последующем определении массовых долей элементов с помощью градуировочных характеристик.

Условия проведения анализа соответствуют ГОСТ 18895-97. Данным методом были определены концентрации таких элементов, как углерод, кремний, марганец и титан. Точность измерений соответствует таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Нормы и нормативы контроля точности

Элемент	Массовая доля элементов, %	Погрешность результата анализа $\Delta$ , %
Углерод	0,010 - 0,020	0,004
	0,020 – 0,050	0,008
	0,050 – 0,10	0,012
	0,10 – 0,20	0,016
	0,20 – 0,50	0,024
Кремний	0,010 - 0,020	0,004
	0,020 – 0,050	0,008
	0,050 – 0,10	0,012
	0,10 – 0,20	0,020
	0,20 – 0,50	0,03
	0,50 – 1,0	0,06
Марганец	0,050 – 0,10	0,008
	0,10 – 0,20	0,016
	0,20 – 0,50	0,024
	0,50 – 1,0	0,04
	1,0 – 2,0	0,08
Титан	0,005 - 0,010	0,004
	0,010 – 0,020	0,008
	0,020 – 0,050	0,012
	0,050 – 0,10	0,016
	0,10 – 0,20	0,03

Концентрации компонентов в шлаке определяли с помощью гравиметрического, фотометрического и атомно-абсорбционного анализов.

Гравиметрический анализ - это метод количественного химического анализа, основанный на точном измерении массы определяемого вещества или его составных частей, выделяемых в химически чистом состоянии или в виде соответствующих соединений точно известного постоянного состава. Гравиметрический или весовой метод анализа является одним из важнейших методов количественного химического анализа. Основным достоинством данного метода является его высокая точность (0,1 - 0,2 %).

Фотометрический метод анализа основан на способности определяемого вещества поглощать электромагнитное излучение оптического диапазона. Концентрацию поглощающего вещества определяют, измеряя интенсивность поглощения, которое при определенной длине волны является информацией о качественном и количественном составе определяемого вещества и составляет аналитический сигнал.

Точность фотометрического метода составляет 0,5 – 2,0 %, однако, в реальных условиях погрешность фотометрического определения может достигнуть 5 % из-за погрешностей, возникающих при приготовлении растворов, проведения измерения на приборе и др.

Атомно-абсорбционный анализ (атомно-абсорбционная спектрометрия) - метод количественного элементного анализа по атомным спектрам поглощения (абсорбции). Через слой атомных паров пробы, получаемых с помощью атомизатора, пропускают излучение в диапазоне 190 - 850 нм. В результате поглощения квантов света атомы переходят в возбужденные энергетические состояния. Этим переходам в атомных спектрах соответствуют резонансные линии, характерные для данного элемента. Согласно закону Бугера-Ламберта-Бера, мерой концентрации элемента служит оптическая плотность  $A = \lg(I_0/I)$ , где  $I_0$  и  $I$  - интенсивности излучения от источника соответственно до и после прохождения через поглощающий слой.

Метод атомно-абсорбционного спектрального анализа отличается высокой абсолютной и относительной чувствительностью. Метод позволяет с большой точностью определять в растворах около восьмидесяти элементов в малых концентрациях, поэтому он широко применяется в металлургии для исследований и контроля технологических процессов.

Данными методами были определены концентрации таких компонентов, как оксиды кремния, марганца, титана и железа.

Доля участия основного металла была определена с помощью макроскопического анализа.

Макроскопический анализ (макроанализ) заключается в изучении строения металла путем просмотра его излома или специально подготовленной поверхности (макрошлифа) невооруженным глазом или при небольших увеличениях – до 30 раз. Для проведения анализа макрошлиф шлифуется и подвергается травлению. После травления макроанализ позволяет определить:

- параметры сварного шва (ширина шва, усиление шва (выпуклость), глубина проплавления) и околошовной зоны;

- дефекты;

- величину, форму и расположение кристаллитов.

Строение металла, выявленное таким способом, называется макроструктурой.

При макроанализе одновременно изучается сравнительно большая поверхность и получается информация об общем строении металла, о наличии в нем различных дефектов.

### **3.2 Проведение экспериментов и представление их результатов**

Наплавка осуществлялась на сварочном посту (рис. 3.1), оборудованном источником питания и включенными в схему измерительными приборами (амперметром и вольтметром).

Образец представлял собой пластину размером 200x50x8 мм из стали Ст3 по ГОСТ 380-94. Образец подвергался зачистке от окалины и прочих загрязнений до металлического блеска. Затем осуществлялась наплавка ниточного валика на проход на заданном режиме с целью определения массы израсходованного электрода и массы наплавленного металла. Во время наплавки проводились измерения мгновенных значений тока и напряжения. После взвешивания на эту же пластину наплавлялся валик в 5 слоев для получения в верхнем слое чистого наплавленного металла, то есть без влияния основного металла.

Наплавка производилась в нижнем положении на рекомендованных в ТУ режимах. На каждый диаметр электрода режим настраивался трижды: минимальное значение в рекомендованном диапазоне, среднее значение из диапазона и максимальное. Режим наплавки ниточного и многослойного валиков на одной пластине совпадал.

### 3.2.1 Методика проведения эксперимента

Для проведения экспериментов была разработана методика, позволяющая обеспечить требования ГОСТ 7122-81 и ГОСТ 9466-7 и получить необходимые данные для применения математической модели формирования состава металла шва при ручной дуговой сварке покрытыми электродами.

Методика включает следующие основные этапы:

1. Собрать электрическую схему по рис. 3.1. Эксперимент проводится на постоянном токе обратной полярности.
2. Провести измерения всех величин, указанных в табл. 3.8 в разделе «До наплавки».

Таблица 3.8 - Измеряемые величины

Этап эксперимента	Измеряемая величина		Значение
До наплавки	Масса электрода, г	$m_{эл}$	
	Масса пластины, г	$m_{пл}$	
	Длина электрода, см	$l_{эл}$	

	Длина свободного конца электрода, см	$l_{ск}$	
Во время наплавки	Сварочный ток, А	$I_{св}$	
	Напряжение, В	$U_{д}$	
	Время сварки, с	$t_{св}$	
После наплавки	Масса пластины после наплавки, г	$m_{напл}$	
	Масса пластины без брызг, г	$m_{н-бр}$	
	Масса пластины без шлака, г	$m_{н-шл}$	
	Масса огарка электрода, г	$m_{ог}$	
	Масса стержня огарка, г	$m_{ст.ог.}$	
	Длина огарка, см	$l_{ог}$	
	Масса пластины с 5 валиками, г	$m_{кон}$	

3. Зачистить пластину до металлического блеска.

4. Наплавить ниточный валик на всю длину пластины (рис. 3.2). Колебания электрода не допускаются. Режим наплавки определяем по табл. 3.9.

Таблица 3.9 – Режим наплавки

Положение наплавки – нижнее	Ø 3 мм	Ø 4 мм
Минимальный ток, А		
Средний ток, А		
Максимальный ток, А		

Для каждого диаметра электрода необходимо использовать для наплавки 3 пластины. Каждая пластина предназначена на одну величину тока из рекомендованного диапазона: минимальный ток, средний и максимальный.



Рисунок 3.2 – Ниточный валик

5. Во время наплавки провести измерение величин, указанных в табл. 3.8 в разделе «Во время наплавки».

6. Взвесить пластину после наплавки ниточного валика (с брызгами и шлаком) -  $m_{\text{напл}}$ .

7. Удалить брызги и снова взвесить пластину (со шлаком) -  $m_{\text{н-бр}}$ .

8. Удалить шлак и взвесить пластину -  $m_{\text{н-шл}}$ .

9. Определить параметры огарка электрода, оставшегося после наплавки ниточного валика -  $m_{\text{ог}}$ ,  $m_{\text{ст.ог.}}$ ,  $l_{\text{ог}}$ .

10. Наплавить валик в 5 (пять) слоев на всю длину пластины несколькими электродами (рис. 3.3). Режимы наплавки определяем по табл. 3.9. При наложении каждого последующего слоя необходимо удалить шлак и зачистить валик до металлического блеска.



Рисунок 3.3 – Вид пластины после пятислойной наплавки

11. Взвесить пластину после пятислойной наплавки -  $m_{\text{кон}}$ .

12. Произвести клеймение образца.

### 3.2.2 Результаты экспериментов

В соответствии с методикой, описанной в разделе 3.2.1, были проведены эксперименты с электродами марок УОНИ 13/45 диаметром 4,0 мм, УОНИ 13/55 диаметром 3,0 и 4,0 мм и МР-3 диаметром 4,0 мм.

По итогам каждого эксперимента были получены данные согласно табл. 3.8. Приведем эти данные для электродов УОНИ 13/45 (табл. 3.10 – 3.12).

Таблица 3.10 – Измеренные величины в эксперименте (минимальный ток)

Этап эксперимента	Измеряемая величина		Значение
До наплавки	Масса электрода, г	$m_{эл}$	59,8
	Масса пластины, г	$m_{пл}$	463,6
	Длина электрода, см	$l_{эл}$	45
	Длина свободного конца электрода, см	$l_{ск}$	2,8
Во время наплавки	Сварочный ток, А	$I_{св}$	130
	Напряжение, В	$U_{д}$	24
	Время сварки, с	$t_{св}$	20,6
После наплавки	Масса пластины после наплавки, г	$m_{напл}$	471,6
	Масса пластины без брызг, г	$m_{н-бр}$	471,5
	Масса пластины без шлака, г	$m_{н-шл}$	470,2
	Масса огарка электрода, г	$m_{ог}$	51,0
	Масса стержня огарка, г	$m_{ст.ог.}$	37,2
	Длина огарка, см	$l_{ог}$	38,6
	Масса пластины с 5 валиками, г	$m_{кон}$	514,4

Таблица 3.11 – Измеренные величины в эксперименте (средний ток)

Этап эксперимента	Измеряемая величина		Значение
До наплавки	Масса электрода, г	$m_{эл}$	59,7
	Масса пластины, г	$m_{пл}$	756,6
	Длина электрода, см	$l_{эл}$	45
	Длина свободного конца электрода, см	$l_{ск}$	3,0
Во время наплавки	Сварочный ток, А	$I_{св}$	145
	Напряжение, В	$U_{д}$	24
	Время сварки, с	$t_{св}$	36,6
После наплавки	Масса пластины после наплавки, г	$m_{напл}$	773,3
	Масса пластины без брызг, г	$m_{н-бр}$	773,2
	Масса пластины без шлака, г	$m_{н-шл}$	770,35
	Масса огарка электрода, г	$m_{ог}$	40,8
	Масса стержня огарка, г	$m_{ст.ог.}$	30,2
	Длина огарка, см	$l_{ог}$	31,3
	Масса пластины с 5 валиками, г	$m_{кон}$	839,3



Таблица 3.12 – Измеренные величины в эксперименте (максимальный ток)

Этап эксперимента	Измеряемая величина		Значение
До наплавки	Масса электрода, г	$m_{эл}$	59,0
	Масса пластины, г	$m_{пл}$	447,8
	Длина электрода, см	$l_{эл}$	45
	Длина свободного конца электрода, см	$l_{ск}$	3,0
Во время наплавки	Сварочный ток, А	$I_{св}$	160
	Напряжение, В	$U_{д}$	24
	Время сварки, с	$t_{св}$	27,7
После наплавки	Масса пластины после наплавки, г	$m_{напл}$	461,5
	Масса пластины без брызг, г	$m_{н-бр}$	460,4
	Масса пластины без шлака, г	$m_{н-шл}$	459,2
	Масса огарка электрода, г	$m_{ог}$	43,7
	Масса стержня огарка, г	$m_{ст.ог.}$	32,3
	Длина огарка, см	$l_{ог}$	33,5
	Масса пластины с 5 валиками, г	$m_{кон}$	531,6

Данные, приведенные в табл. 3.10 – 3.12 после обработки позволили представить результаты экспериментов в виде, удобном для дальнейшего использования (табл. 3.13).

Таблица 3.13 – Результаты эксперимента с электродами УОНИ 13/45

Вычисляемая величина	Формула	Результат		
		Ø=4 мм, $K_{МП}=0,38^*$		
		7	8	9
Сварочный ток, А	$I_{св}$	130	145	160
Напряжение дуги, В	$U_{д}$	24,5	24,5	23,8
Мощность дуги, Вт	$P_{д}$	3185	3560	3800
Масса наплавленного металла $m_{напл}^{ме}$	$m_{н-шл} - m_{пл}$	6,6	13,75	11,4
Масса наплавленного шлака $m_{шлака}^{напл}$	$m_{н-бр} - m_{н-шл}$	1,4	2,85	2,2
Расход электрода $m_{эл}$	$m_{эл} - m_{ог}$	8,8	18,9	15,3
Масса наплавленного шлака на 100 г электрода, г	X**	15,9	15,07	14,38
Масса наплавленного металла на 100 г электрода, г	Y***	75,0	72,75	74,5

$$* K_{МП} = \frac{m_{покр}}{m_{ст}} = \frac{15,6}{40,8} = 0,38,$$

где  $m_{покр}$  – масса покрытия электрода, г;

$m_{ст}$  – масса стержня электрода без учета массы свободного конца, г.

При проведении расчетов удобнее оперировать данными, пересчитанными на 100 г расплавленного электрода. Приведем пример расчета для эксперимента на минимальном токе:

$$** X = \frac{m_{эл}^{расч} \cdot m_{шл}^{эксп}}{m_{эл}^{эксп}} = \frac{100 \cdot 1,4}{8,8} = 15,9,$$

$$*** Y = \frac{m_{эл}^{расч} \cdot m_{ме}^{эксп}}{m_{эл}^{эксп}} = \frac{100 \cdot 6,6}{8,8} = 75,0.$$

Аналогично были обработаны результаты экспериментов с электродами УОНИ 13/55 и МР-3. Полученные данные приведены в табл. 3.14 и 3.15.

Таблица 3.14 – Результаты эксперимента с электродами УОНИ 13/55

Вычисляемая величина	Формула	Результат					
		Ø=3, K <sub>мп</sub> =0,45			Ø=4, K <sub>мп</sub> =0,38		
		1	2	3	4	5	6
Сварочный ток, А	I <sub>св</sub>	80	90	100	130	145	160
Напряжение дуги, В	U <sub>д</sub>	25,8	30,0	31,0	22,3	24,8	25,0
Мощность дуги, Вт	P <sub>д</sub>	2064	2700	3100	2900	3600	4000
Масса наплавленного металла $m_{напл}^{ме}$	$m_{н-шл} - m_{пл}$	10,9	15,7	6,0	23,1	19,5	21,7
Масса наплавленного шлака $m_{напл}^{шлака}$	$m_{н-бр} - m_{н-шл}$	3,2	4,7	-	4,9	4,1	4,5
Расход электрода $m_{эл}$	$m_{эл} - m_{ог}$	15,9	23,3	9,0	30,1	25,7	28,9
Масса наплавленного шлака на 100 г электрода, г	X**	20,13	20,17	-	16,28	15,95	15,57
Масса наплавленного металла на 100 г электрода, г	Y***	68,55	67,38	66,6	76,74	75,88	75,09

Таблица 3.15 – Результаты эксперимента с электродами МР-3

Вычисляемая величина	Формула	Результат		
		Ø=4, K <sub>мп</sub> =0,44		
		41Т	42Т	43Т
Сварочный ток, А	I <sub>св</sub>	120	150	180
Напряжение дуги, В	U <sub>д</sub>	20,8	21,2	24,3
Мощность дуги, Вт	P <sub>д</sub>	2496	3180	4374
Масса наплавленного металла $m_{напл}^{ме}$	$m_{н-шл} - m_{пл}$	16,4	19,9	18,0
Масса наплавленного шлака $m_{напл}^{шлака}$	$m_{н-бр} - m_{н-шл}$	5,2	7,4	6,3

Расход электрода $m_{эл}$	$m_{эл} - m_{ог}$	23,7	30,5	28,2
Масса наплавленного шлака на 100 г электрода, г	$X^{**}$	21,9	24,2	22,3
Масса наплавленного металла на 100 г электрода, г	$Y^{***}$	69,12	65,25	63,83

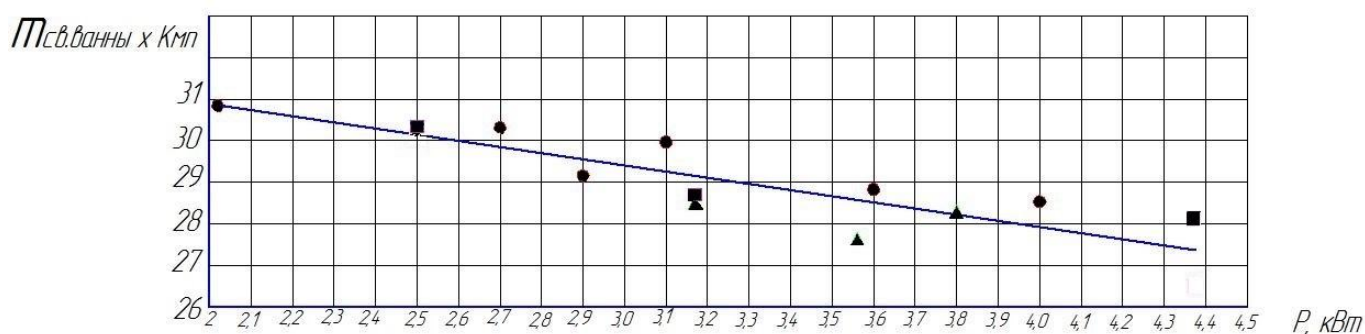
По приведенным данным была построена графическая зависимость (рис. 3.4), позволившая получить регрессионное уравнение:

$$m_{св.ванны} \cdot K_{МП} = 34,28 - 1,59 \cdot P \quad (3.2)$$

С применением методов дисперсионного и регрессионного анализов результатов измерений получили следующие метрологические характеристики:

- среднее квадратичное отклонение  $S_{\bar{X}} = 0,16$  г
- коэффициент детерминации  $R^2 = 0,97$
- $F_{рас.} > F_{таб.}$

Здесь  $F_{рас.}$  - коэффициент Фишера, рассчитанный по экспериментальным данным;  $F_{таб.}$  - табличное значение критерия Фишера;  $X = m_{св.ванны} \cdot K_{МП}$ .



▲ – УОНИ 13/45; ● – УОНИ 13/55; ■ – МР-3

Рисунок 3.4 – Зависимость произведения массы металлической сварочной ванны и коэффициента массы покрытия от мощности дуги

Аналогично были обработаны результаты по зависимости массы шлаковой ванны от параметров режима и характеристик электродов (3.3):

$$m_{шл.ванны} = (59,19 - 5,35 \cdot P) \cdot K_{МП} \quad (S = 0,90; R^2 = 0,79; F_{рас.} > F_{таб.}) \quad (3.3)$$

### 3.2.3 Результаты химического анализа

Для оценки усредненных и парциальных коэффициентов перехода элементов по разработанной математической модели был проведен химический анализ наплавленного металла и шлака для всех вариантов использованных сварочных электродов. Методы анализов описаны в разделе 3.1.7. Результаты анализов приведены в Приложении Б.

### 3.3 Применение математической модели для оценки коэффициентов перехода элементов

Результаты экспериментов (табл. 3.13 – 3.15) и данные нормативных документов на производство электродов исследуемых марок, позволяют применить разработанную математическую модель формирования состава наплавленного металла и металла шва при ручной дуговой сварке для оценки коэффициентов перехода элементов [114].

Согласно разработанным физической и математической моделям определили усредненные и парциальные коэффициенты перехода элементов отдельно для наплавленного металла и металла шва.

Воспользуемся следующими исходными данными для электродов различных марок (табл. 3.16 - 3.17).

Таблица 3.16 - Состав шихты покрытия

Составляющая покрытия	Содержание компонентов шихты покрытия, мас.%		
	УОНИ 13/45	УОНИ 13/55	MP-3
Мрамор	55,30	53,78	18,1
Плавленый шпат	18,40	17,58	-
Песок кварцевый	9,20	7,65	-
Сода	1,70	0,72	-
Ферромарганец $FeMn$	2,05	5,80	15,1
Ферротитан $FeTi$	10,25	8,27	-
Ферросилиций $FeSi$	3,10	6,20	-
Концентрат рутиловый	-	-	50,2
Тальк молотый	-	-	10,1
Каолин обогащенный	-	-	5,0
Целлюлоза электродная	-	-	1,5

Таблица 3.17 - Состав компонентов шихты

Составляющая шихты	Химический состав	Содержание, мас. %
Мрамор	$CaCO_3$	97,0
	$MgO$	1,0
	$SiO_2$	0,7
Плавиновый шпат	$CaF_2$	97,0
	$SiO_2$	2,0
Песок кварцевый	$SiO_2$	97,0
Сода	$Na_2CO_3$	99,4
	$NaCl$	0,2
Ферромарганец ФМн88	$Mn$	90,0
	$Si$	3,0
	$C$	2,0
Ферросилиций ФС45	$Si$	44,0
	$Mn$	0,6
	$Al$	2,0
Ферротитан ФТи30	$Ti$	33,0
	$Al$	8,0
	$Si$	4,0
	$C$	0,12
Концентрат рутиловый	$TiO_2$	94,0
	$Al_2O_3$	0,5
	$FeO$	3,0
	$SiO_2$	1,5
	$ZrO_2$	1,0
Тальк молотый	$MgO$	28,0
	$FeO$	6,75
	$CaO$	0,5
Каолин обогащенный	$Al_2O_3$	36,0
	$FeO$	0,6
	$TiO_2$	0,4

Стержень всех электродов изготовлен из проволоки марки Св-08А по ГОСТ 2246-70. Химический состав приведен в Приложении Б.

В качестве связующего использовано калиево-натриевое жидкое стекло (табл. 3.18).

Таблица 3.18 – Свойства связующего

Характеристика жидкого стекла	УОНИ 13/45, УОНИ 13/55	МР-3
Модуль, $m$	2,88	3,01
Плотность, $P$ , г/см <sup>3</sup>	1,48	1,40
Содержание связующего	26	27

(жидкого стекла) в покрытии электрода, $\alpha$ , мас. %		
Массовая доля сухого остатка связующего, $\beta$ *	0,42	0,38

$$* \beta = 0,59 \cdot P + 0,028 \cdot m - 0,535$$

### 3.3.1 Методика применения математической модели

#### для наплавленного металла

В соответствии с таблицей 2.1 определим по данным эксперимента величины, необходимые для использования системы уравнений (2.26), позволяющей рассчитать парциальные коэффициенты перехода элементов [115].

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\eta}_{\mathcal{E}_i} &= a \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}} + b \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ф}} + c \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + b(1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + c K_3^{\mathcal{E}_i}, & (2.26) \\ m_{\mathcal{E}_i} &= m_{\text{эл}} \frac{1 - K_{\text{пот}}^{\text{мс}}}{1 + K_{\text{мп}}} \times \\ &\times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}}{100} (1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + \frac{K_{\text{мп}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} (1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + \left[ \sum_{j=1}^j \frac{\% j (\mathcal{E}_{in} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta (\mathcal{E}_{in} O_m)_{\text{св}}}{100} \right] \frac{M_{\mathcal{E}_i}}{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}} K_3^{\mathcal{E}_i} \right) \right\} \\ m_{\mathcal{E}_{in} O_m} &= m_{\text{эл}} \frac{1 - K_{\text{пот}}^{\text{шп}}}{1 + K_{\text{мп}}} \times \\ &\times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}}{100} \frac{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}}{M_{\mathcal{E}_i}} K_2^{\mathcal{E}_i} + \frac{K_{\text{мп}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} \frac{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}}{M_{\mathcal{E}_i}} K_1^{\mathcal{E}_i} + \left( \sum_{j=1}^j \frac{\% j (\mathcal{E}_{in} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta (\mathcal{E}_{in} O_m)_{\text{св}}}{100} \right) (1 - K_3^{\mathcal{E}_i}) \right) \right\} \end{aligned} \right.$$

#### Расчет параметров математической модели по экспериментальным данным.

Коэффициент перехода элемента  $\bar{\eta}_{\mathcal{E}_i}$  определяет содержание элемента в наплавленном металле или металле шва.

По экспериментальным данным появляется возможность найти усредненный коэффициент перехода элемента.

$$\bar{\eta}_i = \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{напл. ме}}}{[\mathcal{E}_i]_{\text{смешению}}} = \frac{m_{\mathcal{E}_i}}{m_{\mathcal{E}_i}^{\text{смеш}}}, \quad (3.4)$$

где  $[\text{Э}_i]_{\text{напл.ме}}$  - концентрация элемента  $\text{Э}_i$  в наплавленном металле по данным химического анализа, мас. %.

$[\text{Э}_i]_{\text{смешению}}$  - концентрация элемента  $\text{Э}_i$  в наплавленном металле по смешению, мас. %.

$$m_{\text{Э}_i} = \frac{[\text{Э}_i]_{\text{напл.ме}}}{100} \cdot m_{\text{напл.ме}} \quad (3.5)$$

где  $m_{\text{напл.ме}}$  - масса наплавленного металла при использовании 100 г электрода, кг.

$m_{\text{Э}_i}^{\text{смеш}}$  - определяется по уравнению (2.7).

Учитывая выведенные зависимости для коэффициентов  $a, b, c$  (2.31 – 2.33), получаем первое уравнение системы в следующем виде:

$$\eta_{\text{Э}_i} = \frac{100 \cdot (1 - K_{\text{пот}}^{\text{ме}})}{m_{\text{ме}} (1 + K_{\text{МП}})} \eta_{\text{Э}_i}^{\text{ст}} + \frac{100 \cdot (1 - K_{\text{пот}}^{\text{ме}}) \cdot K_{\text{МП}} \sum \frac{\% \text{фер}}{100}}{m_{\text{ме}} (1 + K_{\text{МП}}) \left(1 + \frac{\alpha\beta}{100}\right)} \eta_{\text{Э}_i}^{\text{ф}} +$$

$$+ \frac{m_{\text{ме}} - \frac{100 \cdot (1 - K_{\text{пот}}^{\text{ме}})}{(1 + K_{\text{МП}})} - \frac{100 \cdot (1 - K_{\text{пот}}^{\text{ме}}) \cdot K_{\text{МП}} \sum \frac{\% \text{фер}}{100}}{(1 + K_{\text{МП}}) \left(1 + \frac{\alpha\beta}{100}\right)}}{m_{\text{ме}}} \eta_{\text{Э}_i}^{\text{ш}} \quad (3.6)$$

$$m_{\text{Э}_i} = \frac{(\text{Э}_{in} \text{O}_m)_{\text{шл}}}{100} \cdot m_{\text{шл}} \quad (3.7)$$

Приведем расчет парциальных коэффициентов перехода элементов для электродов УОНИ 13/45 диаметром 4 мм.

Обобщим результаты экспериментов на максимальном токе.

$$I_{\text{св}} = 160 \text{ А}, U_{\text{д}} = 23,8 \text{ В}, P = 3,8 \text{ кВт}, m_{\text{ме}} = 74,5 \text{ г}, m_{\text{шл}} = 14,38 \text{ г}, \gamma_{\text{осн}} = 0,54.$$

Химические составы приведены в табл. 3.19.

Таблица 3.19 - Составы металла и шлака

Концентрации компонентов, мас. %	C	Mn	Si
Наплавленный металл	0,066	0,599	0,177
Металл шва	0,115	0,868	0,366
Стержень электрода	0,07	0,421	0,025
Основной металл	0,203	0,511	0,187

Данные электродов:

- масса электрода в расчетах – 100 г;
- масса стержня – 72,5 г.;
- масса покрытия – 27,5 г.
- масса покрытия без жидкого стекла – 24,80 г;
- масса сухого остатка жидкого стекла – 2,7 г;
- масса ферросплавов в покрытии

$$\frac{2,05 + 10,25 + 3,10}{100} \cdot 24,8 = 3,82 \text{ г}$$

Используя приведенные данные, определим коэффициент потерь металла (2.36).

$$m_{\text{ст}} + m_{\text{фер}} = 72,5 + 3,82 = 76,32 \text{ г}$$

$$K_{\text{пот}}^{\text{ме}} = \frac{76,32 - 74,5}{76,32} = 0,024$$

Аналогично были рассчитаны коэффициенты потерь металла для электродов УОНИ 13/55 и МР-3 (табл. 3.20).

Таблица 3.20 – Коэффициенты потерь металла

Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Коэффициент потерь металла		
		Сварочный ток		
		Минимальный	Средний	Максимальный
УОНИ 13/45	4	0,017	0,047	0,024
УОНИ 13/55	3	0,079	0,095	0,105
	4	0,010	0,021	0,031
МР-3	4	0,061	0,114	0,133

Обработка полученных данных позволила найти зависимость коэффициента потерь металла от мощности и коэффициента массы покрытия (3.8):

$$K_{\text{пот}}^{\text{ме}} = 1,3 \cdot K_{\text{МП}} + 0,036 \cdot P - 0,592 \quad (S = 0,003; R^2 = 0,84; F_{\text{рас.}} > F_{\text{таб.}}) \quad (3.8)$$

Используя приведенные данные, определим коэффициент потерь шлака.

Существенное влияние на конечную массу шлака оказывает удаление углекислого газа при нагреве и плавлении электрода. Основными



газообразующими компонентами в составе шихты электродов УОНИ 13/45 являются мрамор и сода.

Массу мрамора в покрытии вычислим следующим образом:

$$\frac{55,3}{100} \cdot 24,8 = 13,72 \text{ г}$$

Массу соды в покрытии вычислим аналогично:

$$\frac{1,7}{100} \cdot 24,8 = 0,42 \text{ г}$$

Масса вещества, г	13,72		$X_1$
Химическая реакция	$CaCO_3 = CaO + CO_2$		
Молярная масса вещества	100		44

Найдем массу углекислого газа, образующегося при разложении мрамора:

$$X_1 = \frac{13,72 \cdot 44}{100} = 6,04 \text{ г } CO_2$$

Масса вещества, г	0,42		$X_2$
Химическая реакция	$Na_2CO_3 = Na_2O + CO_2$		
Молярная масса вещества	104		44

Найдем массу углекислого газа, образующегося при разложении соды:

$$X_2 = \frac{0,42 \cdot 44}{104} = 0,18 \text{ г } CO_2$$

В наплавленном металле (Приложение Б) отсутствует титан. Это свидетельствует о том, что титан из ферросплава полностью окисляется. При этом по данным [9] 60 % оксида титана переходит в шлак, а 40 % после взаимодействия с  $CaF_2$  переходит в газовую фазу в виде  $TiF_4$ .

Массу титана в ферросплаве определим следующим образом:

$$m_{Ti} = \frac{100 \cdot 0,38 \cdot 10,25 \cdot 33}{1,38 \cdot 1,1089 \cdot 100 \cdot 100} = 0,84 \text{ г } Ti$$

Масса вещества, г	0,84		$X_3$
Химическая реакция	$Ti + O_2 = TiO_2$		
Молярная масса вещества	48		80

$$X_3 = \frac{0,84 \cdot 80}{48} = 1,4 \text{ г } TiO_2$$

Вычислим массы веществ, которые получаются и используются при взаимодействии фторида кальция с оксидом титана

Масса вещества, г	$X_4$	1,4·0,4	$X_5$	$X_6$
Химическая реакция	$2CaF_2 + TiO_2 = 2CaO + TiF_4$			
Молярная масса вещества	2·78	80	2·56	124

$$X_4 = \frac{1,4 \cdot 0,4 \cdot 2 \cdot 78}{80} = 1,09 \text{ г } CaF_2$$

$$X_5 = \frac{1,4 \cdot 0,4 \cdot 2 \cdot 56}{80} = 0,78 \text{ г } CaO$$

$$X_6 = \frac{1,4 \cdot 0,4 \cdot 124}{80} = 0,87 \text{ г } TiF_4$$

Таким образом, из 27,5 г покрытия электрода в газ в виде  $CO_2$  и  $TiF_4$  удаляется 7,09 г. Из шлака удаляется 1,09 г  $CaF_2$ , а вводится дополнительно 0,84 г  $TiO_2$  и 0,78 г  $CaO$ . Кроме того, необходимо учесть количество оксидов марганца и кремния, которые получаются при окислении компонентов электродного стержня и ферросплавов.

$$m_{MnO} = m_{MnO}^{ст} + m_{MnO}^{фер} = \frac{100 \cdot 0,421}{1,38 \cdot 100} (1 - \eta_{Mn}^{ст}) \frac{71}{55} + \frac{0,38 \cdot 1,86}{1,38 \cdot 1,1089} (1 - \eta_{Mn}^{\phi}) \frac{71}{55} = 1,026 - 0,394 \eta_{Mn}^{ст} - 0,596 \eta_{Mn}^{\phi}$$

$$m_{SiO_2} = m_{SiO_2}^{ст} + m_{SiO_2}^{фер} = \frac{100 \cdot 0,025}{1,38 \cdot 100} (1 - \eta_{Si}^{ст}) \frac{60}{28} + \frac{0,38 \cdot 1,84}{1,38 \cdot 1,1089} (1 - \eta_{Si}^{\phi}) \frac{60}{28} = 1,002 - 0,039 \eta_{Si}^{ст} - 0,979 \eta_{Si}^{\phi}$$

По литературным данным [9] при сварке покрытыми электродами низкоуглеродистых и низколегированных сталей восстановления металла из шлаковой фазы практически не происходит. Поэтому величину  $c$  можно считать равной 0. Соответственно,  $K_3^{Si} = \eta_{Si}^m = 0$ .

Таким образом, парциальные коэффициенты для углерода, марганца и кремния можно определить по экспериментальным данным о составе наплавленного металла. В этом случае третье уравнение системы (2.26) можно использовать для оценки адекватности рассчитанных парциальных коэффициентов перехода элементов. Для этого необходимо рассчитать по данному уравнению массу оксида элемента и сравнить ее с экспериментальной.

На образование шлака остается максимум следующее количество компонентов:

$$m_{\text{шл}} = m_{\text{пок}} - m_{\text{фер}} - m_{\text{газ}} + m_{\text{ок}} = 19,164 - 0,394\eta_{Mn}^{\text{ст}} - 0,596\eta_{Mn}^{\text{ф}} - 0,039\eta_{Si}^{\text{ст}} - 0,979\eta_{Si}^{\text{ф}} \text{ г.} \quad (3.9)$$

Коэффициент потерь для шлака можно рассчитать после определения парциальных коэффициентов перехода для углерода, кремния и марганца.

Расчет усредненных и парциальных коэффициентов перехода элементов.

Приведем подробный вариант расчета для электродов УОНИ 13/45 диаметром 4 мм на максимальном токе.

Рассчитаем усредненный коэффициент перехода кремния по уравнению (3.3). Для этого необходимо определить массу кремния в наплавленном металле по результатам химического анализа и массы кремния, которые могут перейти в наплавленный металл из стержня электрода и ферросплавов покрытия.

$$m_{Si}^{\text{н.ме}} = \frac{74,5 \cdot 0,177}{100} = 0,132 \text{ г}$$

$$m_{Si}^{\text{ст}} = \frac{100 \cdot 0,025}{(1 + 0,38) \cdot 100} = 0,018 \text{ г}$$

$$m_{Si}^{\text{фер}} = \frac{0,38 \cdot 1,836}{(1 + 0,38) \cdot 1,109} = 0,456 \text{ г}$$

$$\bar{\eta}_{Si} = \frac{0,132}{0,018 + 0,456} = 0,278$$

Подставим исходные данные в уравнения системы (2.26):

$$\begin{cases} 0,278 = \frac{100 \cdot (1 - 0,024)}{74,5 \cdot (1 + 0,38)} \eta_{Si}^{cr} + \frac{100 \cdot (1 - 0,024) \cdot 0,38 \cdot 0,154}{74,5 \cdot 1,38 \cdot 1,109} \eta_{Si}^{\phi} + 0 \cdot \eta_{Si}^{\phi} \\ 0,132 = 100 \cdot \frac{1 - 0,024}{1,38} \cdot \left\{ \frac{0,025}{100} \eta_{Si}^{cr} + \frac{0,38}{1,109} \left( \frac{2,05}{100} \cdot \frac{90}{100} + \frac{3,1}{100} \cdot \frac{44,0}{100} \right) \cdot \eta_{Si}^{\phi} \right\} \end{cases}$$

Проведя преобразования, получим:

$$\begin{cases} 0,278 = 0,949 \eta_{Si}^{cr} + 0,050 \eta_{Si}^{\phi} \\ 0,132 = 0,018 \eta_{Si}^{cr} + 0,445 \eta_{Si}^{\phi} \end{cases}$$

Выразим одно неизвестное из первого уравнения:

$$\eta_{Si}^{\phi} = \frac{0,278 - 0,949 \eta_{Si}^{cr}}{0,050}$$

Подставим во второе уравнение:

$$0,132 = 0,018 \eta_{Si}^{cr} + \frac{0,445}{0,050} (0,278 - 0,949 \eta_{Si}^{cr})$$

$$2,292 = 8,428 \eta_{Si}^{cr}$$

$$\eta_{Si}^{cr} = 0,272$$

$$\eta_{Si}^{\phi} = 0,397$$

Аналогично были рассчитаны усредненные и парциальные коэффициенты перехода углерода, марганца и кремния для минимального, среднего и максимального токов. Полученные результаты сведены в таблицу 3.21.

Таблица 3.21 – Парциальные коэффициенты перехода для УОНИ 13/45

Парциальный коэффициент перехода элементов	Значения тока из рекомендованного в ТУ диапазона	Элемент		
		<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>
$\eta_{\Delta_i}^{\phi}$	Минимальный ток	0,784	0,766	0,198
	Средний ток	0,750	0,692	0,333
	Максимальный ток	0,730	0,500	0,397
$\eta_{\Delta_i}^{cr}$	Минимальный ток	1,0	0,744	0,350
	Средний ток	0,847	0,636	0,315
	Максимальный ток	0,728	0,589	0,272
$\bar{\eta}_{\Delta_i}$	Минимальный ток	0,796	0,745	0,342
	Средний ток	0,750	0,638	0,316
	Максимальный ток	0,718	0,541	0,278

После обработки полученных данных (табл. 3.21) выведены регрессионные уравнения (табл. 3.26), связывающие усредненные и парциальные коэффициенты перехода элементов в наплавленный металл с приведенной мощностью ( $P/S$ ), где  $S$  – площадь сечения электродного стержня ( $\text{мм}^2$ ).

Данные таблицы 3.21 позволяют рассчитать коэффициент потерь шлака по уравнениям (3.9) и (2.37). Напомним, что расчеты приводятся для максимального тока (табл. 3.22).

$$m_{\text{шл}} = 19,164 - 0,394 \cdot 0,589 - 0,596 \cdot 0,500 - 0,039 \cdot 0,272 - 0,979 \cdot 0,397 = 18,234$$

$$K_{\text{пот}}^{\text{шл}} = \frac{18,234 - 14,38}{18,234} = 0,211$$

Таблица 3.22 – Коэффициенты потерь шлака

Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Коэффициент потерь шлака		
		Сварочный ток		
		Минимальный	Средний	Максимальный
УОНИ 13/45	4	0,127	0,170	0,211
УОНИ 13/55	3	0,254	0,239	-
	4	0,105	0,182	0,225
МР-3	4	0,102	0,139	0,260

Обработка результатов данных, приведенных в табл. 3.22 позволила получить следующую зависимость:

$$K_{\text{пот}}^{\text{шл}} = 1,364 \cdot P/S - 0,282 \quad (S = 0,019; R^2 = 0,91; F_{\text{рас.}} > F_{\text{таб.}}) \quad (3.10)$$

Аналогично были рассчитаны усредненные и парциальные коэффициенты перехода элементов для электродов УОНИ 13/55 диаметром 3 и 4 мм (табл. 3.23, 3.24) и МР-3 диаметром 4 мм (табл. 3.25).

Таблица 3.23 – Парциальные коэффициенты перехода для УОНИ 13/55, диаметр 3 мм

Парциальный коэффициент перехода элементов	Значения тока из рекомендованного в ТУ диапазона	Элемент		
		C	Mn	Si
$\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ф}}$	Минимальный ток	0,936	0,656	0,140
	Средний ток	0,960	0,564	0,098
	Максимальный ток	-	0,356	0,079
$\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ст}}$	Минимальный ток	0,725	0,578	0,132
	Средний ток	0,732	0,496	0,088
	Максимальный ток	-	0,433	0,070

$\bar{\eta}_{\Theta_i}$	Минимальный ток	0,741	0,597	0,133
	Средний ток	0,749	0,504	0,089
	Максимальный ток	-	0,362	0,071

Таблица 3.24 – Парциальные коэффициенты перехода для УОНИ 13/55, диаметр 4 мм

Парциальный коэффициент перехода элементов	Значения тока из рекомендованного в ТУ диапазона	Элемент		
		<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>
$\eta_{\Theta_i}^{\Phi}$	Минимальный ток	0,859	0,499	0,267
	Средний ток	0,773	0,456	0,136
	Максимальный ток	0,787	0,464	0,337
$\eta_{\Theta_i}^{CT}$	Минимальный ток	0,837	0,493	0,233
	Средний ток	0,727	0,442	0,117
	Максимальный ток	0,708	0,435	0,175
$\bar{\eta}_{\Theta_i}$	Минимальный ток	0,838	0,500	0,235
	Средний ток	0,730	0,443	0,118
	Максимальный ток	0,713	0,445	0,186

Таблица 3.25 – Парциальные коэффициенты перехода для МР-3, диаметр 4 мм

Парциальный коэффициент перехода элементов	Значения тока из рекомендованного в ТУ диапазона	Элемент			
		<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>
$\eta_{\Theta_i}^{\Phi}$	Минимальный ток	1,0	0,863	0,400	-
	Средний ток	1,0	0,746	0,324	-
	Максимальный ток	1,0	0,610	0,221	-
$\eta_{\Theta_i}^{CT}$	Минимальный ток	0,780	0,963	0,463	-
	Средний ток	0,503	0,738	0,340	-
	Максимальный ток	0,717	0,450	0,183	-
$\bar{\eta}_{\Theta_i}$	Минимальный ток	0,796	0,890	0,440	$2,71 \cdot 10^{-4}$
	Средний ток	0,531	0,725	0,332	$4,53 \cdot 10^{-4}$
	Максимальный ток	0,733	0,490	0,154	$6,17 \cdot 10^{-4}$
$\eta_{\Theta_i}^{шл}$	Минимальный ток	-	-	-	$2,71 \cdot 10^{-4}$
	Средний ток	-	-	-	$4,53 \cdot 10^{-4}$
	Максимальный ток	-	-	-	$6,17 \cdot 10^{-4}$

Таблица 3.26 – Уравнения для расчета усредненных и парциальных коэффициентов перехода элементов для всех исследованных марок электродов

Элемент	$\eta_{\Theta_i}^{\Phi}$	$\eta_{\Theta_i}^{CT}$	$\bar{\eta}_{\Theta_i}$
<i>Mn</i>	$1,30 - 2,15 \cdot P/S$	$1,83 - 4,32 \cdot P/S$	$1,41 - 2,65 \cdot P/S$
<i>Si</i>	$0,67 - 1,40 \cdot P/S$	$0,85 - 2,0 \cdot P/S$	$0,85 - 2,0 \cdot P/S$
<i>C</i>	$2,81 - 6,86 \cdot P/S$	$1,24 - 1,53 \cdot P/S$	$1,20 - 1,59 \cdot P/S$
<i>Ti</i>	$\bar{\eta}_{\Theta_i} = \eta_{\Theta_i}^{шл} = (25,9 \cdot P/S - 2,47) \cdot 10^{-4}$		

### 3.3.2 Методика применения математической модели для металла шва

В соответствии с разработанной математической моделью формирования состава металла шва при ручной дуговой сварке (п. 2.2.2), рассчитаем параметры процессов перехода элементов.

Для оценки коэффициентов перехода элементов из основного металла в металл шва (2.40) и усредненных коэффициентов перехода элемента (2.41) используем экспериментальные данные и величины, рассчитанные в предыдущих разделах.

Подробно опишем расчет этих величин для кремния при наплавке электродами УОНИ 13/45 диаметром 4 мм на максимальном токе.

Подставим в формулу (2.40) данные химического анализа и обработки экспериментов.

$$\eta_{Si}^{o.m.} = \frac{0,366 - 0,177 \cdot 0,46}{0,650 \cdot 0,54} = 0,81$$

На последнем этапе расчетов оценили усредненный коэффициент перехода кремния<sub>i</sub> в металл шва (2.41).

$$\bar{\eta}_{Si}^{шов} = \frac{0,366}{0,177 \cdot 0,46 + 0,650 \cdot 0,54} = 0,85$$

Результаты расчетов сведены в табл. 3.27 – 3.29.

Таблица 3.27 – Коэффициенты перехода элемента в металл шва для УОНИ 13/45

Парциальный коэффициент перехода элементов	Значения тока из рекомендованного в ТУ диапазона	Элемент		
		<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>
$\eta_{\Delta_i}^{o.m.}$	Минимальный ток	-	-	-
	Средний ток	0,518	0,471	0,476
	Максимальный ток	0,765	0,780	0,810
$\bar{\eta}_{\Delta_i}^{шов}$	Минимальный ток	-	-	-
	Средний ток	0,667	0,685	0,640
	Максимальный ток	0,813	0,838	0,850
$\gamma_{o.m.}$	Минимальный ток	0,33		
	Средний ток	0,41		
	Максимальный ток	0,54		

Таблица 3.28 – Коэффициенты перехода элемента в металл шва для УОНИ 13/55

Парциальный коэффициент перехода элементов	Значения тока из рекомендованного в ТУ диапазона	Элемент		
		<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>
Диаметр 3 мм				
$\eta_{Э_i}^{o.m.}$	Минимальный ток	0,992	0,989	0,308
	Средний ток	0,899	-	0,448
	Максимальный ток	-	0,986	0,376
$\eta_{Э_i}^{-шов}$	Минимальный ток	0,994	0,996	0,462
	Средний ток	0,927	-	0,585
	Максимальный ток	-	0,997	0,424
$\gamma_{o.m.}$	Минимальный ток	0,39		
	Средний ток	0,41		
	Максимальный ток	0,55		
Диаметр 4 мм				
$\eta_{Э_i}^{o.m.}$	Минимальный ток	0,473	0,484	0,338
	Средний ток	0,724	0,361	0,157
	Максимальный ток	0,507	0,396	0,274
$\eta_{Э_i}^{-шов}$	Минимальный ток	0,720	0,793	0,586
	Средний ток	0,813	0,648	0,288
	Максимальный ток	0,643	0,640	0,414
$\gamma_{o.m.}$	Минимальный ток	0,33		
	Средний ток	0,45		
	Максимальный ток	0,50		

Таблица 3.29 – Коэффициенты перехода элемента в металл шва для МР-3

Парциальный коэффициент перехода элементов	Значения тока из рекомендованного в ТУ диапазона	Элемент			
		<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>
$\eta_{Э_i}^{o.m.}$	Минимальный ток	0,848	0,951	0,860	0,723
	Средний ток	-	-	-	0,858
	Максимальный ток	0,798	-	0,984	0,923
$\eta_{Э_i}^{-шов}$	Минимальный ток	0,897	0,984	0,946	0,859
	Средний ток	-	-	-	0,930
	Максимальный ток	0,845	-	0,993	0,961
$\gamma_{o.m.}$	Минимальный ток	0,30			
	Средний ток	0,41			
	Максимальный ток	0,50			

$$\gamma_{o.m.} = 0,24 + 0,75 \cdot P/S \quad (S = 0,021; R^2 = 0,52; F_{рас.} > F_{таб.}) \quad (3.11)$$



Разработанный расчетно-экспериментальный метод дает возможность оценить усредненный и парциальные коэффициенты перехода элементов в наплавленный металл и металл шва в зависимости от параметров режима сварки. В связи с этим, полученные регрессионные уравнения позволяют рассчитать состав металла при любых заданных параметрах режима.

Выводы по главе 3:

1. Разработана методика проведения экспериментов по исследованию влияния параметров режима на процессы взаимодействия при ручной дуговой сварке покрытыми электродами, учитывающая испарение и разбрызгивание;

2. Проведены по разработанной методике эксперименты с электродами марок УОНИ 13/45, УОНИ 13/55, МР-3, позволившие получить зависимости показателей процесса взаимодействия от приведенной мощности и коэффициента массы покрытия.

3. Впервые определены парциальные коэффициенты перехода элементов из металлических и шлаковой фаз при ручной дуговой сварке покрытыми электродами и их зависимости от параметров режима;

4. Впервые определены зависимости коэффициентов потерь металла и шлака от параметров режима при ручной дуговой сварке покрытыми электродами;

5. Получены зависимости массы металлической и шлаковой ванн от параметров режима сварки и характеристик сварочных электродов для низкоуглеродистых низколегированных сталей;

6. С помощью инструментов математической статистики определена точность полученных экспериментальных и расчетных результатов. Сравнение рассчитанных по экспериментальным данным и табличных значений критерия Фишера показывают статистическую значимость полученных регрессионных зависимостей.

## ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СОСТАВА ПОКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОДА

Как показано в предыдущих разделах работы, известные методы термодинамического и кинетического анализа, а также данные о механизме отдельных стадий гетерогенных реакций при моделировании ручной дуговой сварки не позволяют получить достаточно адекватную модель процесса и использовать ее для дальнейших расчетов. Отсутствие равновесия при сварке, сложность и не достоверность определения скоростей и времени взаимодействия, а также значений межфазных площадей при ручной дуговой сварке затрудняют использование термодинамических и кинетических моделей и, как следствие, не обеспечивают получение надежных результатов [1, 2]. Разработанные физическая и математическая модели процесса сварки покрытыми электродами на основе метода полного материального баланса позволили создать систему уравнений, которая обеспечивает расчет усредненного и парциальных коэффициентов перехода элементов в наплавленный металл.

По существовавшей в СССР практике передача нормативной технической документации от разработчиков электродов к их производителям осуществлялась практически безвозмездно. В связи с этим авторский надзор отсутствовал. Поэтому и в настоящее время большая часть сварочных электродов выпускается, как правило, без надзора разработчиков [7]. Для снижения себестоимости электродов предприятия-производители модернизируют состав шихты покрытий, весьма часто в ущерб их качественным характеристикам. В результате этого, а также имеющей место существенной разницы в техническом уровне производств, электроды одних и тех же марок могут существенно отличаться по сварочно-технологическим свойствам [7]. В тоже время, состав шихты покрытия сварочных электродов не всегда оптимизирован по количеству ферросплавов и других компонентов.

Зная потребность в методике, позволяющей предсказать химический состав металла на основе состава шихты и наоборот, а также обладая разработанной

математической моделью на основе полного материального баланса и экспериментальными данными, можно разработать методику совершенствования состава покрытия сварочных электродов.

#### 4.1 Разработка методики совершенствования состава покрытия сварочных электродов

Из системы уравнений (2.26) было выведено соотношение (4.1), которое показывает материальный баланс каждого элемента в металлической фазе:

$$m_{\mathcal{E}_i} = m_{\text{ЭЛ}} \frac{1 - K_{\text{пот}}^{\text{мс}}}{1 + K_{\text{МП}}} \times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{СТ}}}{100} (1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + \frac{K_{\text{МП}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} (1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + \left[ \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_{\text{СВ}}}{100} \right] \frac{M_{\mathcal{E}_i}}{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}} K_3^{\mathcal{E}_i} \right) \right\} \quad (4.1)$$

Данное уравнение положено в основу методики совершенствования количества ферросплавов в шихте электродов, позволяющие при заданных параметрах режима получить необходимые (желаемые) концентрации легирующих элементов в наплавленном металле.

Рассмотрим условия применимости уравнения (4.1) для поставленной выше задачи.

Должны быть определены параметры режима (сварочный ток, напряжение дуги, диаметр электрода и коэффициент массы покрытия).

Масса элемента, входящая в левую часть уравнения (4.1), задается через концентрацию элемента (необходимую или желаемую) и может быть найдена по выражению (3.4). Масса электрода принимается равной 100 г.

Эксперименты (глава 3) позволили найти значения масс сварочной и шлаковой ванн, коэффициентов потерь металла и шлака при заданных параметрах режима, а также установить зависимость этих величин от параметров процесса. Зная экспериментальные зависимости коэффициента потерь металла (3.7) и парциальных коэффициентов перехода элементов (табл. 3.22, 3.26) можно найти указанные величины и подставить их в уравнение (4.1).

Вышеизложенное позволяет решить обратную задачу: подобрать такие концентрации компонентов покрытия сварочных электродов (ферросплавов), которые обеспечат необходимое (заданное) содержание элементов в зависимости от параметров режима.

Критерием выбора компонентов покрытия может являться усредненный состав наплавленного металла, который приводится в соответствующих документах на производство конкретной марки сварочных электродов. В тоже время возможна следующая стадия разработки, когда корректировка состава покрытия осуществляется с точки зрения доступности компонентов, экономической выгоды при производстве сварочных электродов.

Следует отметить, что уравнение (4.1) необходимо получить для каждого легирующего элемента. Число уравнений (4.1) должно быть не меньше, чем количество ферросплавов, которое вводится в покрытие электродов.

Методика решения задачи поиска содержания компонентов в покрытии сварочных электродов (ферросплавов) может быть представлена следующим образом.

1. Задать параметры режима: диаметр электрода (мм), сварочный ток (А) и напряжение на дуге (В). Источником данной информации может служить технологическая документация на сварку.

2. Рассчитать полную мощность источника нагрева  $P$  (кВт).

3. Рассчитать площадь сечения металлического стержня сварочного электрода  $S$  (мм<sup>2</sup>).

4. Рассчитать величину приведенной мощности  $P/S$  (кВт/мм<sup>2</sup>).

5. Задать значение концентрации данного элемента в наплавленном металле  $[Э_i^{\text{HM}}]$  (мас. %). Необходимая концентрация элемента может быть определена ГОСТом на типичный состав наплавленного металла – если производится оптимизация действующих покрытий или желаемая – если разрабатывается новый состав шихты электродного покрытия.

6. Задать коэффициент массы покрытия ( $K_{\text{мп}}$ ) из диапазона рекомендуемых значений в ТУ на изготовление данной марки электродов.

7. По уравнению (3.2) рассчитать массу наплавленного металла (г).

8. Рассчитать массу данного элемента в наплавленном металле (г) по уравнению (3.5):

$$m_{\text{Э}_i} = m_{\text{СВ.ВАННЫ}} \frac{[\text{Э}_i^{\text{HM}}]}{100}. \quad (3.5)$$

9. Задать марку проволоки для изготовления стержня сварочного электрода.

10. Из марочника или ГОСТа задать концентрацию элемента  $\text{Э}_i$  в проволоке (мас. %).

11. Вычислить значения коэффициента потерь металла ( $K_{\text{пот}}^{\text{MC}}$ ) по уравнению (3.8):

$$K_{\text{пот}}^{\text{MC}} = 1,3 \cdot K_{\text{МП}} + 0,025 \cdot P - 0,557 \quad (3.8)$$

12. По уравнениям, приведенным в таблицах 3.22, 3.26, рассчитать значения парциальных коэффициентов перехода элемента.

13. Расчеты по пунктам 5 - 12 осуществить для всех легирующих элементов.

14. Задать величины  $\alpha$  и  $\beta$ , а также содержание оксида кремния в жидком стекле.

При нанесении покрытия опрессовкой  $\alpha$  принимается в пределах 20 - 25 % от массы сухой смеси. Величина  $\beta$  определяется по эмпирической формуле (2.14):

$$\beta = 0,59 \cdot P + 0,028 \cdot m - 0,535, \quad (2.14)$$

где  $P$  - плотность жидкого стекла, г/см<sup>3</sup>;  $m$  - модуль жидкого стекла.

15. Подставить полученные данные в уравнение (4.1) для каждого легирующего элемента в отдельности, таким образом получается система уравнений, в которой число уравнений совпадает с числом легирующих элементов.

16. При расчете по уравнению (4.1) принять содержание оксидных компонентов  $\sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\text{Э}_{in} \text{O}_m)_j}{100}$ , как в исходных электродах.

17. Из уравнения (4.1) для каждого легирующего элемента найти величину  $A_{\text{Э}_i}$ . Величина  $A_{\text{Э}_i}$  представляет собой суммарное количество каждого легирующего элемента, введенного в покрытие электрода через ферросплав (4.2):

$$A_{\text{Э}_i} = \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\text{Э}_i]_k}{100} \quad (4.2)$$

18. Рассчитать количество ферросплавов в покрытии электродов.

Для этого необходимо выбрать марки ферросплавов, которые предполагают ввести в покрытие электродов. Подставить в уравнение (4.2) для каждого легирующего элемента концентрации данного элемента в выбранной марке ферросплава. Получится система уравнений, по которой можно найти концентрацию каждого ферросплава в покрытии электрода.

На данном этапе необходимо провести анализ марок ферросплавов. Анализ может проводиться как с точки зрения наличия данного компонента на предприятии (у поставщика), так и с точки зрения содержания элемента в нем. Следует обратить внимание и на выбор проволоки (см. п. 9, 10 Методики). Если требуемое содержание элемента в наплавленном металле можно получить из проволоки, то ферросплав можно выбрать с меньшим его содержанием, и наоборот.

19. Рассчитать массу каждого ферросплава по уравнению (4.3)

$$m_{\text{ФЕР}_k} = m_{\text{ЭЛ}} \frac{1 - K_{\text{пот}}^{\text{ме}}}{1 + K_{\text{МП}}} \cdot \frac{K_{\text{МП}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \cdot \frac{\% \text{фер}_k}{100} \quad (4.3)$$

20. Рассчитать суммарную массу легирующих компонентов покрытия (ферросплавов) по выражению (4.4):

$$m_{\text{Л}} = \sum m_{\text{ФЕР}_k} \quad (4.4)$$

21. Рассчитать массу шлакообразующей части покрытия по уравнению (4.5) [116]:

$$m_{\text{Ш}} = \frac{K_{\text{МП}}(100 - m_{\text{Л}})}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} - m_{\text{Л}}, \quad (4.5)$$

где  $m_{\text{Ш}}$  - сумма масс всех неметаллических компонентов покрытия, за исключением сухого остатка жидкого стекла.

22. Зная  $m_{л}$ ,  $m_{ш}$  и их сумму, можно определить массу стабилизирующих компонентов, необходимых для повышения технологических свойств электродов (сода, поташ и др.), а также пластификаторов, служащих для повышения технологичности изготовления электродов (калиевая слюда, бентонит и др.). Обычно их содержание задается в пределах 1 - 2 % от массы сухой смеси покрытия [116].

23. Рассчитать новое значение коэффициента массы покрытия  $K_{мп}$  по уравнению (4.7). Значение массы сухого остатка жидкого стекла использовать из базового варианта [116].

$$K_{мп} = \frac{m_{л} + m_{ш} + m_{с}}{100 - m_{л}} \quad (4.6)$$

24. При необходимости повторить расчеты по пунктам 14 - 23.

Оценить необходимость повторного расчета по пунктам 14 - 24 можно из сравнения величин  $K_{мп}$ , полученных в двух последовательных вариантах. Если эти значения отличаются друг от друга не более, чем на 10 % и входят в рекомендованный в ТУ интервал, то расчеты можно не повторять.

Аналогичным образом можно определить наиболее экономичный вариант состава покрытия электродов. Для этого необходимо рассчитать себестоимость различных вариантов состава покрытия, которые дают близкий по концентрациям легирующих элементов наплавленный металл, что гарантирует необходимые эксплуатационные характеристики при экономии ресурсов.

## **4.2 Применение методики для совершенствования состава покрытия электродов**

Покажем на примере методику совершенствования состава шихты электродного покрытия для электродов УОНИ 13/45.

1. Задаем параметры режима:

- диаметр электрода 4 мм,
- сварочный ток 150 А,

- напряжение на дуге 24 В.

2. Рассчитываем полную мощность источника нагрева  $P$  (кВт).

$$P = I \cdot U = 150 \cdot 24 = 3600 = 3,6 \text{ кВт}$$

3. Рассчитываем площадь сечения металлического стержня сварочного электрода  $S$  (мм<sup>2</sup>).

$$S = \pi \cdot R^2 = 3,14 \cdot 2^2 = 12,56 \text{ мм}^2$$

4. Рассчитываем величину приведенной мощности  $P/S$  (кВт/мм<sup>2</sup>).

$$\frac{P}{S} = \frac{3,6}{12,56} = 0,287 \text{ кВт/мм}^2$$

5. Задаем значение концентрации каждого элемента в наплавленном металле  $[\text{Э}_i^{\text{HM}}]$  (мас. %).

Примем типичный химический состав наплавленного металла согласно ГОСТ 9467-60.

$$[\text{C}^{\text{HM}}] = 0,085 \text{ мас.}\%$$

$$[\text{Si}^{\text{HM}}] = 0,2 \text{ мас.}\%$$

$$[\text{Mn}^{\text{HM}}] = 0,65 \text{ мас.}\%$$

6. Задаем коэффициент массы покрытия ( $K_{\text{МП}}$ ) из диапазона рекомендуемых значений в ТУ на изготовление данной марки электродов.

Диапазон значений 0,35 - 0,45. Принимаем  $K_{\text{МП}} = 0,38$ .

7. По уравнению (3.2) рассчитываем массу наплавленного металла (г).

$$m_{\text{св.ВАННЫ}} \cdot K_{\text{МП}} = 33,9 - 1,5 \cdot P$$

$$m_{\text{св.ВАННЫ}} = \frac{33,9 - 1,5 \cdot P}{K_{\text{МП}}} = \frac{33,9 - 1,5 \cdot 3,6}{0,38} = 75,0 \text{ г}$$

8. Рассчитаем массу каждого легирующего элемента в наплавленном металле (г) по уравнению (3.4):

$$m_{\text{C}} = m_{\text{св.ВАННЫ}} \frac{[\text{Э}_c^{\text{HM}}]}{100} = 75,0 \cdot \frac{0,085}{100} = 0,064 \text{ г}$$

$$m_{\text{Si}} = 75,0 \frac{0,2}{100} = 0,15 \text{ г}$$



$$m_{Mn} = 75,0 \frac{0,65}{100} = 0,488 \text{ г}$$

9. Задаем марку проволоки для изготовления стержня сварочного электрода – Св-08А по ГОСТ 2246-70.

10. Задаем концентрацию элемента  $\Xi_i$  в проволоке (мас. %).

$$[C]_{ст} = 0,1 \text{ мас.}\%$$

$$[Si]_{ст} = 0,025 \text{ мас.}\%$$

$$[Mn]_{ст} = 0,475 \text{ мас.}\%$$

11. Вычислим значения коэффициента потерь металла ( $K_{пот}^{ме}$ ) по уравнению (3.7):

$$K_{пот}^{ме} = 1,3 \cdot K_{МП} + 0,025 \cdot P - 0,557 = 1,3 \cdot 0,38 + 0,025 \cdot 3,6 - 0,557 = 0,027$$

12. По уравнениям, приведенным в таблицах 3.26, рассчитываем значения парциальных коэффициентов перехода элемента.

Элемент	$\eta_{\Xi_i}^{\phi}$	$\eta_{\Xi_i}^{ст}$	$\bar{\eta}_{\Xi_i}$
<i>Mn</i>	$1,30 - 2,15 \cdot P/S = 0,683$	$1,83 - 4,32 \cdot P/S = 0,590$	$1,41 - 2,65 \cdot P/S = 1,223$
<i>Si</i>	$0,67 - 1,40 \cdot P/S = 0,268$	$0,85 - 2,0 \cdot P/S = 0,276$	$0,85 - 2,0 \cdot P/S = 0,276$
<i>C</i>	$2,81 - 6,86 \cdot P/S = 0,841$	$1,24 - 1,53 \cdot P/S = 0,801$	$1,20 - 1,59 \cdot P/S = 0,743$
<i>Ti</i>	$\eta_{\Xi_i}^{шл} = \bar{\eta}_{\Xi_i} = (25,9 \cdot P/S - 2,47) \cdot 10^{-4}$		

13. Зададим величины  $\alpha$  и  $\beta$ , а также содержание оксида кремния в жидком стекле.

$$\alpha = 26 \text{ мас.}\%$$

$$\beta = 0,59 \cdot P + 0,028 \cdot m - 0,535 = 0,59 \cdot 1,48 + 0,028 \cdot 2,88 - 0,535 = 0,42$$

14. Подставив полученные данные в уравнение (4.1) для каждого легирующего элемента в отдельности, получим систему уравнений, в которой число уравнений совпадает с числом легирующих элементов.

$$\left\{ \begin{array}{l} m_C = 100 \frac{1-0,027}{1+0,38} \times \left\{ \frac{0,1}{100} \cdot 0,801 + \frac{0,38}{1 + \frac{26 \cdot 0,42}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_K}{100} \frac{[\text{Э}_i]_K}{100} \cdot 0,841 \right) \right\} \\ m_{Si} = 100 \frac{1-0,027}{1+0,38} \times \\ \times \left\{ \frac{0,025}{100} \cdot 0,276 + \frac{0,38}{1 + \frac{26 \cdot 0,42}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_K}{100} \frac{[\text{Э}_i]_K}{100} \cdot 0,268 + \left[ \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\text{Э}_{in} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\text{Э}_{in} O_m)_{CB}}{100} \right] \frac{M_{\text{Э}_i}}{M_{\text{Э}_{in} O_m}} \cdot 0 \right) \right\} \\ m_{Mn} = 100 \frac{1-0,027}{1+0,38} \times \left\{ \frac{0,475}{100} \cdot 0,590 + \frac{0,38}{1 + \frac{26 \cdot 0,42}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_K}{100} \frac{[\text{Э}_i]_K}{100} \cdot 0,683 \right) \right\} \end{array} \right.$$

15. Из уравнения (4.1) для каждого легирующего элемента найдем величину  $A_{\text{Э}_i}$ , то есть суммарное количество каждого легирующего элемента, введенного в покрытие электрода через ферросплав.

$$m_C = 70,51 \times \{0,000748 + 0,2799 \cdot A_C\}$$

Масса углерода в левой части уравнения была найдена в п.7 методики.

Подставляя эти значения и раскрывая скобки получаем:

$$0,064 = 0,0530 + 19,74 \cdot A_C$$

$$A_C = 0,00056$$

$$m_{Si} = 70,51 \times \{0,000069 + 0,0918 \cdot A_{Si}\}$$

$$0,15 = 0,0049 + 6,47 \cdot A_{Si}$$

$$A_{Si} = 0,02242$$

$$m_{Mn} = 70,51 \times \{0,0028 + 0,234 \cdot A_{Mn}\}$$

$$0,488 = 0,1976 + 16,5 \cdot A_{Mn}$$

$$A_{Mn} = 0,0176$$

Составим систему уравнений для определения концентрации ферросплавов.

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,00056 = \frac{\% FeMn}{100} \cdot \frac{[C]_{FeMn}}{100} + \frac{\% FeTi}{100} \cdot \frac{[C]_{FeTi}}{100} \\ 0,02242 = \frac{\% FeMn}{100} \cdot \frac{[Si]_{FeMn}}{100} + \frac{\% FeSi}{100} \cdot \frac{[Si]_{FeSi}}{100} + \frac{\% FeTi}{100} \cdot \frac{[Si]_{FeTi}}{100} \\ 0,0176 = \frac{\% FeMn}{100} \cdot \frac{[Mn]_{FeMn}}{100} + \frac{\% FeSi}{100} \cdot \frac{[Mn]_{FeSi}}{100} \end{array} \right.$$

После преобразований получим:

$$\begin{cases} 5,6 = \% FeMn \cdot [C]_{FeMn} + \% FeTi \cdot [C]_{FeTi} \\ 224,2 = \% FeMn \cdot [Si]_{FeMn} + \% FeSi \cdot [Si]_{FeSi} + \% FeTi \cdot [Si]_{FeTi} \\ 176,0 = \% FeMn \cdot [Mn]_{FeMn} + \% FeSi \cdot [Mn]_{FeSi} \end{cases}$$

Выберем марки ферросплавов, которые предполагаем ввести в покрытие электродов.

Вклад ферротитана в концентрацию углерода в наплавленном металле не превышает 25 %. Из анализа составов ферромарганца (ФМн 88, ФМн 90) и ферротитана выбираем ФМн 88 и ФТи 30.

Подставим в уравнение (4.2) для каждого легирующего элемента концентрации данного элемента в выбранной марке ферросплава. Получится система уравнений, по которой можно найти концентрацию каждого ферросплава в покрытии электрода.

Состав компонентов шихты берем из табл. 3.17.

$$\begin{cases} 5,6 = \% FeMn \cdot 2 + \% FeTi \cdot 0,12 \\ 224,2 = \% FeMn \cdot 3 + \% FeSi \cdot 44 + \% FeTi \cdot 4 \\ 176,0 = \% FeMn \cdot 90 + \% FeSi \cdot 0,6 \end{cases}$$

Решая данную систему, получим:

Ферросплав	Найденная концентрация	Базовая концентрация (по ТУ)
<i>FeMn</i>	1,93	2,05
<i>FeTi</i>	13,21	10,25
<i>FeSi</i>	3,81	3,1

16. Рассчитаем массу каждого ферросплава по уравнению (4.3)

$$m_{FeMn} = 100 \cdot \frac{1-0,027}{1+0,38} \cdot \frac{0,38}{1+\frac{26 \cdot 0,42}{100}} \cdot \frac{\% FeMn}{100}$$

$$m_{FeMn} = 0,466 \text{ г}$$

$$m_{FeTi} = 100 \cdot \frac{1-0,027}{1+0,38} \cdot \frac{0,38}{1+\frac{26 \cdot 0,42}{100}} \cdot \frac{\% FeTi}{100}$$

$$m_{FeTi} = 3,19 \text{ г}$$

$$m_{FeSi} = 100 \cdot \frac{1-0,027}{1+0,38} \cdot \frac{0,38}{1+\frac{26 \cdot 0,42}{100}} \cdot \frac{\% FeSi}{100}$$

$$m_{FeSi} = 0,92 \text{ г}$$

17. Рассчитаем суммарную массу легирующих компонентов покрытия (ферросплавов) по выражению (4.4):

$$m_{л} = \sum m_{ФЕР_k} = 0,466 + 3,19 + 0,92 = 4,576 \text{ г}$$

18. Рассчитаем массу шлакообразующей части покрытия по уравнению (4.5):

$$m_{ш} = \frac{K_{МП}(100 - m_{л})}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} - m_{л} = \frac{0,38(100 - 4,576)}{1,109} - 4,576 = 28,12 \text{ г}$$

19. Зная  $m_{л}$ ,  $m_{ш}$  и их сумму, можно определить массу стабилизирующих компонентов:

$$m_{с} = 0,02 \cdot (m_{л} + m_{ш}) = 0,02 \cdot (4,576 + 28,12) = 0,65 \text{ г}$$

20. Рассчитаем новое значение коэффициента массы покрытия  $K_{МП}$  по уравнению (4.6).

$$K_{МП} = \frac{m_{л} + m_{ш} + m_{с}}{100 - m_{л}} = \frac{4,576 + 28,12 + 0,65}{100 - 4,576} = 0,35$$

Сравнивая величины  $K_{МП}$  из базового варианта и полученное значение делаем вывод, что разница составляет 7%, что допустимо. Кроме того, полученное значение входит в рекомендованный в ТУ интервал. Следующий цикл расчетов можно не проводить.

Так как при указании составов проволоки, ферросплавов и наплавленного металла приводятся не конкретные значения, а диапазоны концентраций элементов, были рассчитаны другие варианты. Полученные значения концентраций ферросплавов находятся в следующих диапазонах: ферромарганец 1,9 – 2,1 мас. %, ферросилиций 3,2 – 3,8 мас. %, ферротитан 11,0 – 15,0 мас. %.

Таким образом, можно сделать следующие выводы по результатам расчетов:

- предложенная методика позволяет рассчитывать содержание ферросплавов в шихте покрытия электродов;
- разработанный состав шихты покрытия электродов УОНИ 13/45 по содержанию ферросплавов близок к эффективному.

Выводы по главе 4:

1. На основании полученных в работе закономерностей перехода элементов в наплавленный металл при ручной дуговой сварке предложена методика расчета и совершенствования состава шихты покрытий сварочных электродов.

2. Применение предложенной методики позволило рассчитать содержание ферросплавов в составе шихты покрытия электродов УОНИ 13/45.

3. Сравнение рассчитанного состава шихты и данных технических условий на изготовление электродов УОНИ 13/45 показали применимость разработанной методики для оценки количества ферросплавов в покрытии сварочных электродов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам выполнения диссертационной работы можно сформулировать следующие выводы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Разработаны физическая и математическая модели ручной дуговой сварки покрытыми электродами, основанные на полном материальном балансе элементов в металле и шлаке, учитывающие структуру процесса, взаимодействие и перенос компонентов, а также формирование металлической и шлаковой ванн.

2. Установлена адекватность физической и математической моделей на основе сравнения усредненных коэффициентов перехода элементов, рассчитанных по полученным уравнениям и независимым экспериментальным данным для 10 марок электродов.

3. Разработана методика проведения экспериментов по исследованию влияния параметров режима на процессы взаимодействия при ручной дуговой сварке покрытыми электродами, учитывающая потери металла и шлака, в том числе на испарение и разбрызгивание.

4. Впервые определены парциальные коэффициенты перехода элементов из металлических и шлаковых фаз при ручной дуговой сварке покрытыми электродами марок УОНИ 13/45, УОНИ 13/55 и МР-3 и их зависимости от параметров режима, которые могут быть распространены практически на все марки электродов, предназначенных для сварки низкоуглеродистых низколегированных сталей.

5. На основе обработки экспериментальных данных получены регрессионные уравнения, позволяющие оценивать потери металла и шлака при ручной дуговой сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей покрытыми электродами в зависимости от параметров режима процесса.

6. Впервые получены зависимости доли участия основного металла, масс металлической и шлаковой ванн от параметров режима сварки и характеристик покрытых электродов.

7. На основании разработанной математической модели и полученных

регрессионных уравнений предложена методика расчета и совершенствования состава шихты покрытий сварочных электродов.

8. Сравнение рассчитанного состава шихты и данных технических условий на изготовление электродов УОНИ 13/45 показали применимость разработанной методики для оценки количества ферросплавов в покрытии сварочных электродов.

**Перспективы дальнейшей разработки темы** заключаются в следующем:

- проведение экспериментально-теоретического исследования перехода элементов в наплавленный металл и металл шва при сварке порошковой проволокой и электродами других типов (по прочностным характеристикам, по типу покрытия, по назначению);

- применение описанной методики расчета на предприятиях по выпуску сварочных материалов для совершенствования состава шихты покрытия электродов и разработки новых электродов;

- использование полученных закономерностей перехода элементов в наплавленный металла и металл шва при подготовке бакалавров и магистров по направлению 150700 «Машиностроение».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бороненков, В.Н. Моделирование структуры, свойств и процессов межфазного взаимодействия в системе металл – оксидный расплав – газ / В.Н. Бороненков, М.И. Зиниград, Л.И. Леонтьев, Э.А. Пастухов, М.П. Шалимов, С.М. Шанчуров; под ред. академика Л.И. Леонтьева. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 452 с.
2. Походня, И.К. Прогнозирование химического состава металла, наплавленного электродами с рутиловым и ильменитовым покрытиями / И.К. Походня, Г.Е. Коляда, И.Р. Явдошин, О.Г. Касаткин, Л.И. Демченко // Автоматическая сварка. – 1976. – № 7. – С.1–4.
3. Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов / под ред. И.К. Походни. – Киев: Наукова думка, 1990. – 223 с.
4. Подгаецкий, В.В. К вопросу о достижимости термодинамического равновесия при электродуговой сварке / В.В. Подгаецкий, В.И. Галинич // Автоматическая сварка. – 1961. – № 8. – С. 3–12.
5. Ерохин, А.А. Кинетика металлургических процессов дуговой сварки / А.А. Ерохин. – М.: Машиностроение, 1964. – 256 с.
6. Технология и оборудование сварки плавлением: учебник для студентов вузов / А.И. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевич. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.
7. Жизняков, С.Н. Ручная дуговая сварка. Материалы. Оборудование. Технология / С.Н. Жизняков, З.А. Сидлин. – М.: ЦТТ ИЭС им. Е.О. Патона, 2007. – 360 с.
8. Ерохин, А.А. Основы сварки плавлением / А.А. Ерохин. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.
9. Петров, Г.Л. Сварочные материалы / Г.Л. Петров. – Л.: Машиностроение, 1972. – 280 с.



10. Пановко, В.М. О коэффициентах перехода и расчете химического состава металла при наплавке / В.М. Пановко, Е.Г. Блошкин // Сварочное производство. – 1970. – № 8. – С. 33–35.
11. Буки, А.А. Математическая модель процесса окисления легирующих присадок при автоматической сварке в газах / А.А. Буки // Сварочное производство. – 1975. – № 10. – С. 7–11.
12. Походня, И.К. О температуре сварочной ванны / И.К. Походня, И.И. Фруммин // Автоматическая сварка. – 1955. – №5. – С. 14–24.
13. Кусков, В.Н. Разработка расчетно–экспериментальной методики прогнозирования состава электродных покрытий / В.Н. Кусков, А.П. Крылов, А.П. Волохов, Е.В. Ашихмин // Материалы докладов 24 научно–технической конференции сварщиков Урала и Сибири. – Челябинск: изд–во ЮУрГУ, 2005. – С. 87–92.
14. Килина, Е.М. Расчет условных коэффициентов перехода элементов из сварочной проволоки в наплавленный металл при сварке в углекислом газе / Е.М. Килина // Сварка и контроль–2004: всероссийская с международным участием научно–техническая конференция, посвященная 150–летию со дня рождения Славянова Н.Г.: в 3 т. – Пермь, 2004. – Т.3. Сварочные материалы. – С. 263–265.
15. Быков, А.Н. Статистический метод расчета содержания хрома в металле, наплавленном различными электродами / А.Н. Быков, А.И. Зубков // Сварочное производство. – 1981. – № 9. – С. 5–6.
16. Есин, О.А. Физическая химия пирометаллургических процессов : в 2 ч. / О.А. Есин, П.В. Гельд. – Ч. 1. Реакции между газообразными и твердыми фазами. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 672 с.
17. Брусницын, Ю.Д. К вопросу о физико–химических процессах в керамических сварочных флюсах и электродных покрытиях на шлаковой основе мрамор – плавиковый шпат / Ю.Д. Брусницын // Сварка: Сб. – М.: 1959. – С. 95–109.

18. Потапов, Н.Н. Газонасыщение металла швов при сварке электродами с фтористо–кальциевым покрытием / Н.Н. Потапов, В.Б. Пеньков // Сварочное производство. – 2009. – № 4. – С. 16–19.

19. Походня, И.К. Математическое моделирование процессов взаимодействия металла с газами при дуговой сварке / И.К. Походня // Автоматическая сварка. – 2003. – № 2. – С. 3–10.

20. Быков, А.Н. Metallургические процессы окисления ферромарганца в электродных покрытиях при их нагреве / А.Н. Быков, А.А. Ерохин // Автоматическая сварка. – 1961. – № 9. – С. 10–19.

21. Пацкевич, И.Р. Испарение и окисление электродного металла при сварке в газовой среде / И.Р. Пацкевич, О.А. Рыбаков // Автоматическая сварка. – 1971. – № 8. – С. 15–18.

22. Подгаецкий, В.В. О выделении фтористого кремния при нагреве флюса в процессе сварки и при сушке / В.В. Подгаецкий, Т.П. Новикова // Автоматическая сварка. – 1960. – № 6. – С. 19–22.

23. Походня, И.К. Влияние толщины покрытия на характеристики переноса электродного металла / И.К. Походня, Г.Г. Корицкий // Сварочное производство. – 1970. – № 8. – С. 32–33.

24. Семенов, А.П. Методы математического моделирования процессов формирования и переноса капель электродного металла при сварке плавящимся электродом (обзор) / А.П. Семенов // Автоматическая сварка. – 2014. – № 10. – С. 3–12.

25. Явдошин, И. Р. Влияние технологических и металлургических факторов на гигиенические показатели электродов с рутиловым и ильменитовым покрытиями / И.Р. Явдошин, А.В. Булат, В.И. Швачко // Тр. Всесоюз. конф. по свароч. материалам, Орел, сент. 1979. – Киев, 1982. – С. 45–53.

26. Походня, И.К. Газы в сварных швах / И.К. Походня. – М.: Машиностроение, 1972. – 255 с.

27. Заморуев, В.М. О процессах испарения в производстве стали / В.М. Заморуев // Сб. Физико–химические основы производства стали. – Изд. АН СССР, 1960. – С. 177–187.
28. Потапьевский, А.Г. Влияние составляющих режима сварки тонкой проволокой в среде углекислого газа на интенсивность металлургических реакций / А.Г. Потапьевский // Автоматическая сварка. – 1958. – № 2. – С. 11–18.
29. Походня, И.К. Металлургия дуговой сварки конструкционных сталей и сварочные материалы / И.К. Походня // Сварочное производство. – 2009. – № 4. – С. 3–15.
30. Мадэй, К. Влияние марганца на перенос электродного металла при плавлении высокомарганцевой порошковой проволоки / К. Мадэй, И.И. Фрумин, И.А. Кондратьев // Автоматическая сварка. – 1977. – № 9. – С. 18–20.
31. Фрумин, И.И. Автоматическая электродуговая наплавка / И.И. Фрумин. – Харьков: Metallurgizdat, 1961. – 421 с.
32. Ильященко, Д.П. Химический состав сварочного аэрозоля при ручной дуговой сварке покрытыми электродами / Д.П. Ильященко, Е.А. Зернин, С.В. Шадский // Сварочное производство. – 2010. – № 4. – С.28–30.
33. Лесков, Г.И. Электрическая сварочная дуга / Г.И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. – 336 с.
34. Эллист, Д.Ф. Термохимия сталеплавильных процессов / Д.Ф. Эллист, М. Глейзер, В. Рамакришна. – М.: Metallurgiya, 1969. – 252 с.
35. Потапов, Н.Н. О роли плавикового шпата в покрытиях электродов / Н.Н. Потапов, В.В. Баженов, М.Н. Воронкова // Сварка и диагностика. – 2008. – № 2. – С.19–22.
36. Дятлов, В.И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке / В.И. Дятлов // Сб. Новые проблемы сварочной техники. – Киев: Техніка, 1964. – С.167–182.
37. Потапьевский, А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом / А.Г. Потапьевский. – М.: Машиностроение, 1974. – 240 с.

38. Потапьевский, А.Г. Плавление и перенос металла при сварке тонкой проволокой в среде углекислого газа / А.Г. Потапьевский // Автоматическая сварка. – 1958. – № 7. – С.52–59.

39. Сапожков, С.Б. Основные причины разбрызгивания и величина набрызгивания при РДС покрытыми электродами / С.Б. Сапожков, Е.А. Зернин, Д.П. Ильященко // Сварка в Сибири. – 2006. – № 1. – С. 25–27.

40. Ворновицкий, И.Н. Регулирование разбрызгивания электродного металла при ручной дуговой сварке / И.Н. Ворновицкий, Б.В. Семендяев, М.И. Кучерова, Д.В. Арсюков // Сварочное производство. – 2006. – № 9. – С. 22–24.

41. Ильященко, Д.П. Определение потерь на разбрызгивание металла при использовании различных источников питания / Д.П. Ильященко, Е.А. Зернин // Сварочное производство. – 2007. – № 6. – С. 36–39.

42. Ильященко, Д.П. Технологические особенности ручной дуговой сварки покрытыми электродами с применением различных источников питания / Д.П. Ильященко, Е.А. Зернин // Сварочное производство. – 2010. – № 6. – С. 26–28.

43. Ильященко, Д.П. Разбрызгивание при ручной дуговой сварке покрытыми электродами и способы его снижения / Д.П. Ильященко, С.Б. Сапожков // Сварочное производство. – 2007. – № 12. – С. 28–31.

44. Новожилов, Н.М. Основы металлургии дуговой сварки в активных защитных газах / Н.М. Новожилов. – М.: Машиностроение, 1972. – 166 с.

45. Кубашевский, О. Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, Б.М. Гопкинс. – М.: Изд-во иностр. лит., 1955. – 253 с.

46. Шашков, А.Н. Легирование углеродом и кремнием малоуглеродистой стали в электродах для сварки чугуна / А.Н. Шашков // Сварочное производство. – 1955. – № 6. – С.1–5.

47. Походня, И.К. Роль стадий капли и ванны в окислении марганца и кремния при сварке в углекислом газе порошковой проволокой / И.К. Походня, В.Н. Головкин // Автоматическая сварка. – 1974. – № 10. – С. 5–6.

48. Медовар, Б.И. Окисление элементов при сварке в углекислом газе аустенитной электродной проволокой / Б.И. Медовар, Д.А. Дудко, И.Н. Рублевский // Автоматическая сварка. – 1957. – № 3. – С. 64–69.
49. Новожилов, Н.М. Вопросы металлургии сварки в защитных газах / Н.М. Новожилов // Сб. «Новое в технологии сварки». – М.: Машгиз, 1955. – С. 34–37.
50. Лонский, Е.Д. О переходе марганца в наплавленный металл при ручной дуговой электросварке / Е.Д. Лонский // Автогенное дело. – 1952. – № 6. – С. 9–13.
51. Дубова, Т.Н. Регулирование содержания кремния и марганца в наплавленном металле / Т.Н. Дубова // Труды ЛПИ. – 1949. – № 3. – С. 100–110.
52. Баженов, В.В. О природе пор в швах при сварке конструкционных сталей качественными электродами / В.В. Баженов // Сб. «Исследование по технологии сварки». ЦНИИТМАШ, кн. 60. – М.: Машгиз, 1963. – 203 с.
53. Буки, А.А. Об окислительных процессах при автоматической наплавке сталей с охлаждающей жидкостью / А.А. Буки // Сварочное производство. – 1966. – № 6. – С. 16–18.
54. Петров, Г.Л. Сварка жаропрочных сталей / Г.Л. Петров, В.Н. Земзин, Ф.Г. Гонсеровский. – М.: Машгиз, 1963. – 248 с.
55. Новожилов, Н.М. Сварка плавящимся электродом в углекислом газе / Н.М. Новожилов, В.Н. Суслов. – М.: Машгиз, 1958. – 194 с.
56. Походня, И.К. Взаимодействие шлака и металла при дуговой и электрошлаковой наплавке высокохромистых ледебуритных сталей / И.К. Походня // Автоматическая сварка. – 1955. – № 5. – С. 13–46.
57. Патон, Б.Е. О размере электродных капель при сварке под флюсом / Б.Е. Патон // Автоматическая сварка. – 1950. – №4. – С. 44–48.
58. Фруммин, И.И. Низкокремнистые флюсы для автоматической сварки и наплавки / И.И. Фруммин, Д.М. Рабкин, Е.И. Лейначук // Автоматическая сварка. – 1956. – № 1. – С. 3–20.
59. Саламатов, А.М. Математическая модель процессов взаимодействия металла и шлака при дуговой сварке под флюсом: дис....канд.техн.наук: 05.03.06 / Саламатов Андрей Михайлович. – Свердловск, 1982. – 199 с.

60. Бороненков, В.Н. Расчетная оценка кинетики взаимодействия многокомпонентных металла и шлака при сварке под флюсом / В.Н. Бороненков, А.М. Саламатов // Автоматическая сварка. – 1985. – № 8. – С. 19–23.

61. Бороненков, В.Н. Прогнозирование химического состава металла шва при дуговой сварке методом математического моделирования процессов взаимодействия металла, шлака и газа / В.Н. Бороненков, А.М. Саламатов. – Свердловск: Урал. политехн. ин-т, 1985. – 50 с. – Деп. в Черметинформации, № 1591.

62. Давыдов, Ю.С. Прогноз процесса образования шва переменного состава на основе моделирования металлургических процессов / Ю.С. Давыдов, В.Н. Бороненков, А.М. Саламатов // Автоматическая сварка. – 1992. – № 7–8. – С. 23–26.

63. Белов, Ю.М. Программа расчета на ЭВМ составов электродных покрытий и керамических флюсов в зависимости от содержания легирующих элементов в компонентах их шихты / Ю.М. Белов, А.А. Ранцев // Сб. трудов международной научно–технической конференция «Сварочные материалы». – Санкт–Петербург. – 2005. – С. 12–14.

64. Шумкин, В.Н. К вопросу о порядке средней температуры стекающего в шов металла / В.Н. Шумкин // Тр. ДВПИ им. Куйбышева. – 1940. – Вып. 22. – С. 48–53.

65. Кривонос, В.П. Защита шлейфов осциллографа при измерении температуры капель электродного металла / В.П. Кривонос, А. Галигузов, В.Н. Горпенюк // Автоматическая сварка. – 1967. – № 6. – С. 75–76.

66. Походня, И.К. Влияние режима сварки на температуру капель электродного металла / И.К. Походня, В.Н. Горпенюк // Автоматическая сварка. – 1969. – № 8. – С. 9–11.

67. Черных, А.В. Расчет температуры электродных капель при дуговой сварке плавящимся электродом с помощью метода конечных элементов / А.В. Черных, В.В. Черных // Сварочное производство. – 2008. – № 3. – С. 6–7.

68. Кульчицкий, Л.О. Энергетический баланс дуги при сварке металлическими электродами / Л.О. Кульчицкий. – М.: Изд-во АН СССР. – 1941. – 86 с.
69. Попков, А.М. Расчет температуры металла электродных капель при механизированной дуговой сварке / А.М. Попков // Сварочное производство. – 2002. – № 10. – С. 6–7.
70. Фрумин, И.И. Исследование средней температуры сварочной ванны / И.И. Фрумин, И.К. Походня // Автоматическая сварка. – 1955. – № 4. – С. 13–30.
71. Кирдо, И.В. Тепловой баланс сварки под флюсом / И.В. Кирдо // Сборник трудов по автоматической сварке под флюсом. – Киев: Изд. АН УССР, 1948. – С. 95–128.
72. Любавский, К.В. Металлургия автоматической сварки малоуглеродистой стали под флюсом / К.В. Любавский // Вопросы теории сварочных процессов. – М.: Машгиз, 1948. – С. 86–214.
73. Тимофеев, М.М. Замечания к статье действительного члена АН УССР Н.Н. Доброхотова «Взаимодействие элементов окислов в сварочной ванне при сварке металлов» / М.М. Тимофеев // Автогенное дело. – 1949. – № 1. – С. 29–30.
74. Брук, Б.И. Радиоактивные изотопы в металлургии и металловедении сварки / Б.И. Брук. – Л.: Судпромгиз, 1958. – 232 с.
75. Claussen, G. The metallurgy of covered electrode weld metal / G.Claussen // Welding Journal. – 1949 (28). – No 1. – P. 12–24.
76. Кондратьев, В.Н. Кинетика химических газовых реакций / В.Н. Кондратьев. – М.: Изд. АН СССР, 1958. – 682 с.
77. Мазель, А.Г. Технологические свойства электросварочной дуги / А.Г. Мазель. – М.: Машиностроение, 1969. – 178 с.
78. Заруба, И.И. Сварка в углекислом газе / И.И. Заруба, Б.С. Касаткин, Н.И. Каховский, А.Г. Потапьевский. – Киев: Техніка, 1966. – 292 с.
79. Дюргеров, Н.Г. О стабильности процесса сварки короткой дугой в среде углекислого газа / Н.Г. Дюргеров, Ю.Л. Ищенко // Сварочное производство. – 1962. – № 1. – С. 3–10.

80. Федько, В.Т. Влияние компонентов газовой среды на теплофизические свойства сварочной дуги / В.Т. Федько, В.С. Шматченко // Сварочное производство. – 2001. – № 8. – С. 27–31.

81. Макаренко, В.Д. Влияние монооксида углерода на перенос металла при сварке покрытыми электродами / В.Д. Макаренко, Н.Н. Прохоров, Р.В. Палий // Сварочное производство. – 2003. – № 7. – С. 7–10.

82. Походня, И.К. Плавление электродного металла и взаимодействие его со шлаком при сварке под флюсом / И.К. Походня, Б.А. Костенко // Автоматическая сварка. – 1965. – № 10. – С. 16–22.

83. Вологдин, В.П. Исследование скорости плавления электродов при сварке металлической вольтовой дугой / В.П. Вологдин // Вестник Дальневосточного отделения Академии наук СССР. – 1932. – № 1–2. – С. 1–14.

84. Мазель, А.Г. Об оценке переноса металла в дуге при ручной сварке по осциллограммам тока и напряжения дуги / А.Г. Мазель, Е.М. Рогова, Ю.И. Марченко // Сварочное производство. – 1957. – № 12. – С. 9–12.

85. Походня, И.К. Высокопроизводительные электроды с железным порошком / И.К. Походня, А.Е. Марченко, А.М. Бейнин // Автоматическая сварка. – 1961. – № 10. – С. 52–67.

86. Мазель, А.Г. Расплавление электрода и проплавление основного металла при ручной дуговой сварке / А.Г. Мазель // Сварочное производство. – 1960. – № 1. – С. 13–16.

87. Демянцевич, В.П. Определение площади межфазной поверхности газ–металл сварочной ванны / В.П. Демянцевич, В.И. Матюхин // Сварочное производство. – 1975. – № 1. – С. 8–9.

88. Алов, А.А. Вопросы теории сварочных процессов / А.А. Алов. – М.: Машгиз, 1959. – 160 с.

89. Липецкий, И.А. Изменение металлов при сварке / И.А. Липецкий. – М.: Машгиз, 1956. – 183 с.

90. Фрумин, И.И. Легирование наплавленного металла при износостойкой наплавке / И.И. Фрумин. – Киев: изд. АН УССР, 1957. – 64 с.



91. Петров, Г.Л. Характер взаимодействия металла и флюса при автоматической сварке хромоникелевой аустенитной электродной проволокой / Г.Л. Петров, И.Т. Минаков // Сварка: сб. ст. Вып. 5. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 149 с.

92. Минаков, И.Т. Некоторые особенности кремневосстановительных процессов при автоматической сварке под флюсом высоколегированных сталей / И.Т. Минаков, Г.Л. Петров // Сварка: сб. ст. Вып. 6. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 163 с.

93. Макаренко, В.Д. Расчет кинетических характеристик электродных капель при их переходе через дуговой промежуток в процессе сварки покрытыми электродами / В.Д. Макаренко, С.П. Шатило // Сварочное производство. – 1999. – № 2. – С. 6–10.

94. Походня, И.К. Математическое моделирование абсорбции газов капель электродного металла / И.К. Походня, О.М. Портнов // Автоматическая сварка. – 2003. – № 6. – С. 5–8.

95. Коринец, И.Ф. Математическая модель плавления электродной проволоки при дуговой сварке / И.Ф. Коринец // Автоматическая сварка. – 1995. – №10. – С. 39–43.

96. Левченко, О.Г. Математическое моделирование химического состава и уровня выделения сварочного аэрозоля / О.Г. Левченко // Сварочное производство. – 2001. – № 7. – С. 25–28.

97. Попков, А.М. Методика расчета долей электродного металла и металла изделия, образующих сварочную ванну при механизированной дуговой сварке / А.М. Попков // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 2. – С. 25–26.

98. Ильященко, Д.П. Влияние типа источника питания на тепло- и массоперенос при ручной дуговой сварке / Д.П. Ильященко, Д.А. Чиханов // Сварка и диагностика. – 2010. – № 6. – С. 27–30.

99. Дмитрик, В.В. Моделирование процесса электродуговой сварки / В.В. Дмитрик, В.И. Калиниченко // Известия Вузов. Машиностроение. – 2003. – № 4. – С. 59–64.

100. Гецкин, О.Б. Моделирование процесса переноса электродного металла при сварке с короткими замыканиями / О.Б. Гецкин, В.А. Ерофеев, С.И. Полосков // Автоматическая сварка. – 2009. – № 2. – С. 16–21.

101. Сас, А.В. Управление переносом электродного металла / А.В. Сас, В.В. Кривин, И.О. Тямалов, В.А. Руденко // Сварочное производство. – 2010. – № 5. – С. 33–35.

102. Крампит, А.Г. Методы изучения переноса расплавленного электродного металла в сварочной дуге / А.Г. Крампит // Сварка в Сибири. – 2006. – № 1. – С. 21–22.

103. Вотина, Е.Б. Разработка методики расчета состава металла шва при сварке покрытыми электродами или порошковой проволокой / Е.Б. Вотина, М.П. Шалимов // Сварка и диагностика. – 2011. – № 5. – С. 31–35.

104. Мазуровский, В.Л. Физико–химические основы разработки современных сварочных материалов: дис...канд.техн.наук: 02.00.04 / Мазуровский Владимир Львович. – Екатеринбург, 2004. – 145 с.

105. Вотина, Е.Б. Моделирование процесса формирования состава наплавленного металла при ручной дуговой сварке / Е.Б. Вотина, М.П. Шалимов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6: в 2 ч. – 2015. – Ч.2. – С. 134–143.

106. Вотина, Е.Б. Моделирование процессов взаимодействия металла и шлака при ручной дуговой сварке / Е.Б. Вотина, М.П. Шалимов // Сварка и диагностика: сборник докладов научно–технической конференции. Екатеринбург. – 2012. – С. 33–41.

107. Вотина, Е.Б. Методика определения парциальных коэффициентов перехода элементов при ручной дуговой сварке / Е.Б. Вотина, М.П. Шалимов, Н.М. Разиков // Сварка и диагностика. – 2012. – № 1. – С. 28–31.

108. Походня, И.К. Сварка порошковой проволокой / И.К. Походня, А.М. Суптель, В.И. Шлепаков. – Киев: Наукова думка, 1972. – 223 с..

109. Катлер, А.И. Кинетика термического разложения некоторых минералов / А.И. Катлер // Кинетика высокотемпературных процессов; сокр. пер. с англ. / под ред. В.Д. Кинджери. – М.: Машиностроение, 1965. – 444 с.

110. Шлепаков, В.Н. Кинетика газообразования при сварке порошковой проволокой / В.Н. Шлепаков, С.А. Супрун, А.С. Котельчук // Информ. материалы СЭВ. – 1986. – № 1.–С. 19–28.

111. Вотинова, Е.Б. Моделирование процесса дуговой сварки порошковой проволокой / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение, том 17. – 2015. – № 2. – С. 99–109.

112. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 383 с.

113. Романенко, В.Н. Книга для начинающего исследователя–химика / В.Н. Романенко, А.Г. Орлов, Г.В. Никитина. – Л.: Химия, 1987. – 280 с.

114. Вотинова, Е.Б. Парциальные коэффициенты перехода углерода, марганца и кремния при ручной дуговой сварке / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2015. – № 1. – С. 34–41.

115. Вотинова, Е.Б. Взаимосвязь усредненного и парциальных коэффициентов перехода элементов при ручной дуговой сварке / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Вестник Южно–уральского государственного университета. Серия «Металлургия». Том 15. – 2015. – № 1. – С. 88–90.

116. Расчет на ЭВМ состава защитно–легирующих покрытий электродов и шихты порошковой проволоки: методические указания к практическим занятиям по расчету сварочных материалов / А.С. Табатчиков, Б.А. Кулишенко. – Свердловск: МИПК при УПИ им. С. М. Кирова, 1990. – 31 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

**Математическая модель формирования наплавленного металла  
при сварке порошковой проволокой**

Основным этапом разработки технологии сварки является расчет состава металла шва или наплавленного металла, которые, в свою очередь, определяются составом шихты и ленты порошковой проволоки.

Для разработки рационального состава шихты порошковой проволоки необходимо знание процессов, протекающих в дуговом промежутке и при формировании сварного шва. Экспериментальное их изучение и теоретическое описание позволят установить полноту перехода элементов из шихты порошковой проволоки и ее оболочки, а также оценить доли участия основного и присадочного металлов в сварном соединении. Такой подход не позволяет использовать полученные значения  $\bar{\eta}_i$  для анализа процессов при изменившихся параметрах режима.

Поэтому необходимо разработать физическую и математическую модели процесса сварки, учитывающую особенности перехода элементов из порошковой проволоки в наплавленный металл.

*Физическая модель процесса сварки порошковой проволокой.*

Процесс сварки является достаточно сложным для изучения. Такие факторы, как высокая температура металла, скорость протекания реакций и самого процесса, зависимость конечного результата (состав, качество металла шва) от многих факторов, не позволяют изучать данный процесс непосредственно на объекте. Требуется применение модели.

Схему процесса сварки порошковой проволокой можно представить следующим образом.

Электрическая дуга возбуждается между оболочкой порошковой проволоки и основным металлом. За счет тепла, выделяемого в дуге, плавятся оболочка и сердечник проволоки. Процесс плавления порошковой проволоки разделяется на

три стадии, различающиеся по температурным, геометрическим, гидродинамическим и физико-химическим характеристикам. Первая стадия – это нагрев и плавление проволоки. Она в свою очередь подразделяется на нагрев проволоки до плавления и плавление. Во время нагрева происходят такие процессы, как диссоциация различных соединений, испарение воды, окисление ферросплавов и взаимодействие шихтовых материалов в твердом состоянии. На подстадии плавления образуются три вида капель: капли металла, капли шлака и капли металла, покрытые шлаком. Вторая стадия – это перенос капель в ванну (стадия капли), и третья – стадия ванны. В этот период происходит множество разнообразных взаимодействий: капля металла и капля шлака с газовой фазой и между собой, ферросплавов со шлаком.

Расплавившийся металл оболочки и сердечника образует на торце проволоки капли, которые растут и переносятся в сварочную ванну. При расплавлении минералов, руд и химикатов, входящих в состав сердечника, образуется шлак, покрывающий тонким слоем капли и сварочную ванну. При разложении карбонатов и органических материалов сердечника выделяются газы, которые защищают расплавленный металл от воздуха. Проволока по мере оплавления автоматически подается в зону сварки. При удалении дуги жидкий металл сварочной ванны кристаллизуется, образуя сварной шов, покрытый слоем затвердевшего шлака (рис. А.1).

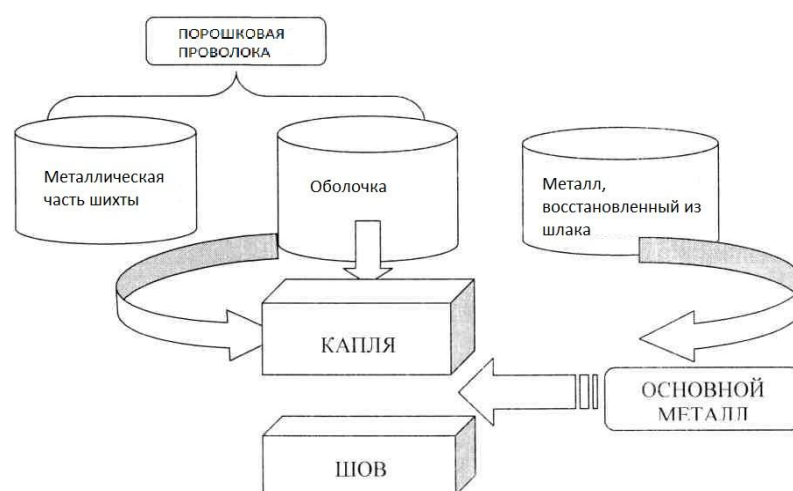


Рисунок А.1 -Физическая модель формирования металла шва

Результаты исследования процессов, протекающих в смесях порошков при нагревании, позволяют заключить следующее. Введение в смесь металлических порошков смещает температурный диапазон диссоциации карбонатов в область более низких температур. Диссоциация карбоната способствует интенсификации окисления железного порошка и ферросплавов. Использование смесей карбонатов способствует более равномерному выделению углекислого газа в широком диапазоне температур при диссоциации карбонатов, чем введение отдельных карбонатов. Приближение состава шлакообразующей части сердечника к составу эвтектических смесей способствует быстрому образованию расплава. Шлакообразованию предшествуют и сопровождают его реакции образования комплексных соединений.

*Математическая модель процесса сварки порошковой проволокой.* Современные тенденции развития науки и техники характеризуются разработкой, внедрением и широким использованием различных моделей, создаваемых как на базе традиционного экспериментального подхода, так и с применением новейших информационных технологий.

На основании предложенной физической модели составим математическую модель процесса сварки порошковой проволокой, основанную на полном материальном балансе в каждой из фаз.

Нагрев и плавление порошковой проволоки сопровождается различными физико-химическими процессами, которые могут быть учтены введением парциальных коэффициентов перехода:

$K_1^{\text{э}i}$  - доля массы компонента  $i$  металлической части шихты, окисляемой газом;

$K_2^{\text{э}i}$  - доля массы компонента  $i$  металла ленты (оболочки), окисляемой газом;

$K_3^{\text{э}i}$  - доля массы оксида компонента  $i$  неметаллической части шихты, переходящей в металл в результате реакций восстановления на стадии капли.

Введем уравнения связывающие величины  $K_1^{\text{э}i}$ ,  $K_2^{\text{э}i}$  и  $K_3^{\text{э}i}$  с парциальными коэффициентами перехода  $\eta_{\text{э}i}$ :

$$1 - K_1^{\ominus_i} = \eta_{\ominus_i}^{\phi}, \quad (\text{A.1})$$

$$1 - K_2^{\ominus_i} = \eta_{\ominus_i}^{\pi}, \quad (\text{A.2})$$

$$K_3^{\ominus_i} = \eta_{\ominus_i}^{\text{ш}}, \quad (\text{A.3})$$

где  $\eta_{\ominus_i}^{\pi}$ ,  $\eta_{\ominus_i}^{\phi}$ ,  $\eta_{\ominus_i}^{\text{ш}}$  - парциальные коэффициенты перехода элемента  $\ominus_i$  в наплавленный металл из ленты, ферросплавов и шлака, соответственно.

В связи с этим можно предположить, что общий (усредненный) коэффициент перехода имеет следующую взаимосвязь с парциальными коэффициентами:

$$\eta_{\ominus_i} = a \eta_{\ominus_i}^{\text{ст}} + b \eta_{\ominus_i}^{\phi} + c \eta_{\ominus_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\ominus_i}) + b(1 - K_2^{\ominus_i}) + c K_3^{\ominus_i}, \quad (\text{A.4})$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  - доли участия электродного стержня, ферросплавов и восстановленного из шлака металла в наплавленном металле;  $\eta_{\ominus_i}$  - общий, усредненный коэффициент перехода элемента  $\ominus_i$ .

Кроме того, процесс сварки порошковой проволокой сопровождается испарением компонентов и разбрызгиванием, учтем их через введение коэффициента потерь  $K_{\text{пот}}$ .

С учетом вышеизложенного, определение парциальных коэффициентов перехода заключается в решении системы уравнений с тремя неизвестными (A.5).

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{\ominus_i} = a \eta_{\ominus_i}^{\text{ст}} + b \eta_{\ominus_i}^{\phi} + c \eta_{\ominus_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\ominus_i}) + b(1 - K_2^{\ominus_i}) + c K_3^{\ominus_i}, \\ \\ m_{\ominus_i} = m_{\text{пр}}(1 - K_{\text{пот}}) \times \\ \times \left\{ (1 - K_{3\text{АП}}) \frac{[\ominus_i]_{\text{л}}}{100} (1 - K_2^{\ominus_i}) + K_{3\text{АП}} \cdot \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\ominus_i]_k}{100} (1 - K_1^{\ominus_i}) + \left[ \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\ominus_{in} O_m)_j}{100} \right] \frac{M_{\ominus_i}}{M_{\ominus_{in} O_m}} K_3^{\ominus_i} \right) \right\} \\ \\ m_{\ominus_{in} O_m} = \frac{m_{\text{пр}}(1 - K_{\text{пот}})}{1 - K_{3\text{АП}}} \times \\ \times \left\{ \frac{[\ominus_i]_{\text{л}}}{100} \frac{M_{\ominus_{in} O_m}}{M_{\ominus_i}} K_2^{\ominus_i} + K_{3\text{АП}} \cdot \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\ominus_i]_k}{100} \frac{M_{\ominus_{in} O_m}}{M_{\ominus_i}} K_1^{\ominus_i} + \left( \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\ominus_{in} O_m)_j}{100} \right) (1 - K_3^{\ominus_i}) \right) \right\} \end{array} \right. \quad (\text{A.5})$$

где  $m_{\ominus_i}$  - масса элемента  $\ominus_i$  в данном объеме металла, кг;  $m_{\text{эл}}$  - масса порошковой проволоки, кг;  $K_{\text{пот}}$  - коэффициент потерь, учитывающий испарение компонентов и

разбрызгивание металла;  $K_{\text{зап}}$  – коэффициент заполнения;  $[\text{Э}_i]_{\text{ст}}$  – концентрация компонента  $\text{Э}_i$  в ленте порошковой проволоки, мас.%;  $\% \text{фер}_k$  – концентрация ферросплава  $k$  в шихте порошковой проволоки, мас.%;  $[\text{Э}_i]_k$  – концентрация компонента  $\text{Э}_i$  в ферросплаве  $k$ , мас.%;  $\% j$  – концентрация минерала  $j$  в шихте порошковой проволоки, мас.%;  $(\text{Э}_{in}O_m)$  – концентрация оксида  $\text{Э}_{in}O_m$  в минерале  $j$ , мас.%;  $M_{\text{Э}_i}$  – атомная масса элемента  $\text{Э}_i$ , кг/моль;  $M_{\text{Э}_{in}O_m}$  – молекулярная масса оксида  $\text{Э}_{in}O_m$ , кг/моль;  $m_{\text{Э}_{in}O_m}$  – масса оксида  $\text{Э}_{in}O_m$  в шлаке, кг.

Таким образом, разработанная методика позволяет оценивать парциальные коэффициенты перехода элементов в зависимости от параметров режима. Это позволит с достаточной точностью рассчитывать состав наплавленного металла, а также проводить корректировку состава шихты порошковой проволоки в зависимости от технологических потребностей.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

**Результаты химического анализа**

Исследования химического состава металла и шлака были проведены в ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ЦЕНТРЕ «СТАВАН-ТЕСТ» ОАО «УРАЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТАЛЛОВ» (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.22ЭФ05).

Протоколы исследований №№ 109 от 02.02.2012, 478 от 25.04.2012, 736 от 28.06.2012, 145 от 17.02.2014, 360 от 16.04.2014, 361 от 16.04.2014, 248 от 25.08.2015, 249 от 25.08.2015.

Методы анализа: спектральный фотоэлектрический, гравиметрический, фотометрический, атомно-абсорбционный.

Применяемые средства измерения: спектрометр SPECTROMAXx, фотоколориметр КФК-2, атомно-абсорбционный спектрофотометр «КВАНТ-2А».

Таблица Б.1 – Результаты химического анализа металла

Исследуемый металл	Элементы, мас.%				
	углерод	кремний	марганец	титан	
Основной металл – Сталь Ст 3сп по ГОСТ 380-2005	0,203	0,185	0,510	-	
Стержень электрода – Св-08А	0,070	0,025	0,421	-	
Наплавленный металл, УОНИ 13/45, Ø 4	Минимальный ток	0,070	0,216	0,762	-
	Средний ток	0,064	0,206	0,674	-
	Максимальный ток	0,066	0,177	0,599	-
Металл шва, УОНИ 13/45, Ø 4	Минимальный ток	0,070	-	-	-
	Средний ток	0,064	0,249	0,674	-
	Максимальный ток	0,066	0,366	0,868	-
Наплавленный металл, УОНИ 13/55, Ø 3	Минимальный ток	0,088	0,179	1,49	-
	Средний ток	0,090	0,122	1,33	-
	Максимальный ток	0,120	0,098	1,01	-
Металл шва, УОНИ 13/55, Ø 3	Минимальный ток	0,134	0,224	1,46	-
	Средний ток	0,141	0,245	1,40	-
	Максимальный ток	-	0,241	1,23	-
Наплавленный металл, УОНИ 13/55, Ø 4	Минимальный ток	0,087	0,282	1,05	-
	Средний ток	0,077	0,143	0,956	-
	Максимальный ток	0,077	0,228	0,968	-
Металл шва, УОНИ 13/55, Ø 4	Минимальный ток	0,090	0,295	0,932	-
	Средний ток	0,105	0,146	0,758	-
	Максимальный ток	0,090	0,244	0,767	-

Наплавленный металл, МР-3, Ø 4	Минимальный ток	0,062	0,190	0,69	0,0027
	Средний ток	0,044	0,218	0,79	0,0046
	Максимальный ток	0,062	0,244	0,87	0,0062
Металл шва, МР-3, Ø4	Минимальный ток	0,105	0,178	0,61	0,0033
	Средний ток	0,128	0,205	0,76	0,0050
	Максимальный ток	0,112	0,213	0,70	0,0061

Таблица Б.2 – Результаты химического анализа шлака

Исследуемый шлак		Компоненты			
		MnO	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe общее
УОНИ 13/45		4,1	32,0	3,60	2,0
УОНИ 13/55, Ø 3		6,5	32,18	3,50	2,0
УОНИ 13/55, Ø 4		6,6	32,14	3,45	2,0
МР-3	Минимальный ток	12,73	19,17	46,7	4,50
	Средний ток	12,72	18,14	47,8	4,49
	Максимальный ток	12,73	19,37	46,7	4,38

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

## Акт передачи методики расчета



Российская федерация  
ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ЗАВОД СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ»  
WELDING MATERIALS COMPANY



Система менеджмента  
качества  
сертифицирована  
и соответствует  
требованиям  
ГОСТ Р ИСО 9001-2001  
(ИСО 9001:2000)

## ЗАО «ЗСМ»

Западная Промзона, № 18, г. Берёзовский, Свердловской обл., 623703  
ОГРН 1026604949360 ГРН 2046603487412 ИНН 6660015269 КПП 660401001  
Р\С 40702810102100000480 К\С 30101810800000000756

В ОАО «СКБ-БАНК», г. ЕКАТЕРИНБУРГ

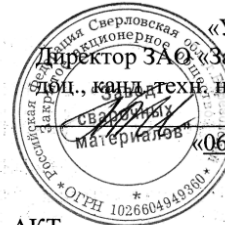
БИК 046577756 ОКПО 44134150 ОКАТО 6541200000 ОКВЭД 28.73

Отгрузочные реквизиты: станция «Свердловск-Товарный»,  
Свердловской ж.-дороги, Код станции 780302. Код предприятия 4075

http: // [www.bzsm.ru](http://www.bzsm.ru)

E-mail: [weldmatc@foramail.ru](mailto:weldmatc@foramail.ru)

г. Берёзовский телефон/факс: (34369) 45957, 45954 ОМТС: (34369) 4-59-51, 4-59-55  
г. Екатеринбург телефон/факс: (343) 3452203, 3452204 Отдел сбыта (343) 345-22-07



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ЗАО «Завод сварочных материалов»,  
Ю.И. кандидатех. наук

А.Н. Балин

«06» октября 2015 г.

АКТ

передачи методики расчета

Настоящим актом подтверждается передача методики расчета и совершенствования состава шихты электродного покрытия, разработанной сотрудниками ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» старшим преподавателем кафедры «Технология сварочного производства» Вотиновой Е.Б. и д.т.н., профессором той же кафедры Шалимовым М.П.

Методика ориентирована на использование в инженерных расчетах и позволяет по определенному числу исходных данных (параметры режима сварки, заданный химический состав наплавленного металла) оценивать количество ферросплавов в шихте покрытия сварочных электродов.

Методика основана на применении математической модели формирования состава наплавленного металла при ручной дуговой сварке.

Методика представлена в виде методических материалов по расчету и примера расчета.

Использование указанной методики при изготовлении сварочных электродов позволяет существенно сократить сроки разработки, оптимизировать технологический процесс и получить экономию трудовых и материальных затрат за счет резкого сокращения или исключения экспериментов по определению химического состава наплавленного металла.

От ЗАО «Завод сварочных материалов»

От УрФУ имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Профессор д.т.н.

М.П. Шалимов

Заместитель директора, к.т.н.

А.А. Вишневыский

Старший преподаватель

Е.Б. Вотинова