

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре «Технология сварочного производства» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

**Шалимов Михаил Петрович**

Официальные оппоненты: **Кривоносова Екатерина Александровна,**

доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический университет»,  
профессор кафедры «Сварочное производство и  
технология конструкционных материалов»;

**Михайлицын Сергей Васильевич,**

кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова», доцент  
кафедры «Машины и технологии обработки  
давлением»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт металлургии Уральского отделения  
РАН, г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «04» февраля 2016 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.10 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан \_\_\_\_ . \_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук

Е.Ю. Раскатов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 в работе проведены исследования, позволившие 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».

С применением методов дисперсионного и регрессионного анализов провели статистическую обработку экспериментальных данных.

**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».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 4 работы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, приложений А, Б и В. Работа изложена на 131 странице, содержит 12 рисунков, 34 таблицы. Библиографический список содержит 116 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранного направления исследований, определена его цель и задачи, сформулированы положения, определяющие научную новизну и практическую ценность диссертационной работы.

**В первой главе** были рассмотрены 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, посвященные прогнозированию физико-химических процессов при сварке металлов. Было установлено, что все приведенные физические и математические модели процесса ручной дуговой сварки не удовлетворяют требованиям адекватности, простоты, рациональности, удобства и практичности. Их анализ показал необходимость разработки физической модели процесса, отражающей все стадии взаимодействия и учитывающей наиболее важные механизмы формирования металла шва и математической модели ручной дуговой сварки покрытыми электродами, которая бы позволила проводить расчет химического состава металла шва, а также решать

обратную задачу – создание на научной основе новых экономнолегированных сварочных материалов.

**Вторая глава** посвящена разработке физической и математической моделей процесса ручной дуговой сварки покрытыми электродами.

Физическая модель процесса сварки покрытыми электродами описывает все процессы, протекающие в зоне сварки с момента зажигания дуги и до момента окончания сварки (или достижения квазистационарного состояния). Для создания физической модели учтены следующие процессы, протекающие в зоне сварки: 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 1.

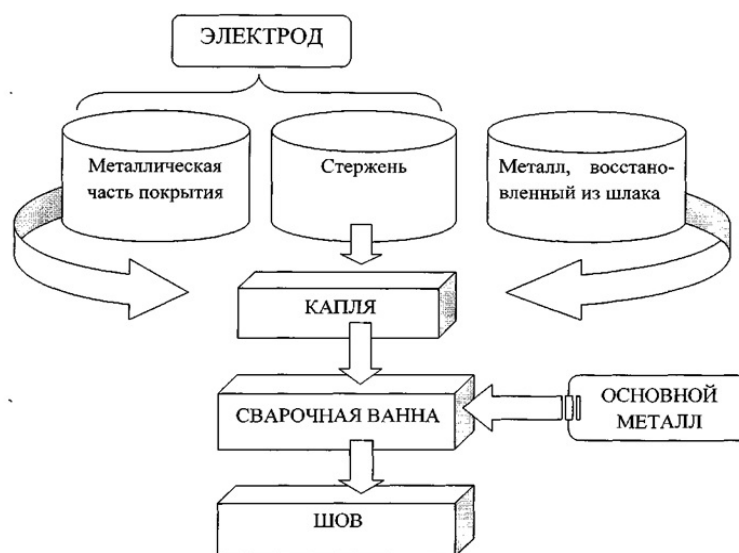


Рисунок 1 - Физическая модель формирования наплавленного металла (шва)

Разработанная физическая модель обладает следующими характеристиками:

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.

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

Для разработки математической модели описали процесс сварки балансовыми 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 ( $\text{Э}_i$ ) 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):

$$\bar{\eta}_{\text{Э}_i} = \frac{m_{\text{Э}_i}^{\text{напл}}}{m_{\text{Э}_i}^{\text{смеш}}}, \quad (1)$$

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.

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

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

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



$K_3^{\text{Э}_i}$  - доля массы оксида компонента  $\text{Э}_i$  неметаллической части покрытия, 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  $\eta_{\text{Э}_i}$ :

$$1 - K_1^{\text{Э}_i} = \eta_{\text{Э}_i}^{\text{ф}}, \quad (2)$$

$$1 - K_2^{\text{Э}_i} = \eta_{\text{Э}_i}^{\text{ст}}, \quad (3)$$

$$K_3^{\text{Э}_i} = \eta_{\text{Э}_i}^{\text{ш}}, \quad (4)$$

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

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

$$\bar{\eta}_{\text{Э}_i} = a\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ф}} + b\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ст}} + c\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\text{Э}_i}) + b(1 - K_2^{\text{Э}_i}) + cK_3^{\text{Э}_i}, \quad (5)$$

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

Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  связаны следующим соотношением (6):

$$a + b + c = 1 \quad (6)$$

Для определения  $\bar{\eta}_{\text{Э}_i}$  по уравнению (1) необходимо знать массы 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  $\text{Э}_i$  из стержня, всех ферросплавов (общим количеством  $j$ ) и восстановленного металла из неметаллической части покрытия имеем:

$$m_{\text{Э}_i}^{\text{напл.}} = m_{\text{Э}_i}^{\text{ст}} \cdot \frac{\text{Э}_i^{\text{ст}}}{100} + \sum_{k=1}^k m_{\text{Э}_i}^{\text{фер}} \cdot \frac{\text{Э}_i^{\text{фер}}}{100} + \sum_{j=1}^j m_j \cdot \frac{\text{Э}_i^j}{100} = m_{\text{Э}_i}^{\text{ст}} + m_{\text{Э}_i}^{\text{фер}} + m_{\text{Э}_i}^{\text{шл}}, \quad (7)$$

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

В соответствии с уравнением (7), выразим массу каждого элемента, попадающего в расплав из стержня.

$$m_{\text{Э}_i}^{\text{ст}} = \frac{m_{\text{эл}}}{1 + K_{\text{МП}}} \cdot \frac{[\text{Э}_i]_{\text{ст}}}{100} \quad (8)$$

Если элемент  $\mathcal{E}_i$  содержится в нескольких ферросплавах, то формула для расчета приобретает следующий вид (9):

$$m_{\mathcal{E}_i}^{\text{фер}} = \frac{m_{\text{эл}} \cdot K_{\text{МП}}}{(1 + K_{\text{МП}}) \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{100}\right)} \cdot \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \cdot \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} \quad (9)$$

Если элемент  $\mathcal{E}_i$  содержится в нескольких неметаллических компонентах покрытия, то получаем (10):

$$m_{\mathcal{E}_i}^{\text{шл}_j} = \frac{m_{\text{эл}} \cdot K_{\text{МП}}}{(1 + K_{\text{МП}}) \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{100}\right)} \cdot \sum_{k=1}^k \frac{\% j}{100} \cdot \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_j}{100} \cdot \frac{M_{\mathcal{E}_i}}{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}} \quad (10)$$

Учтем наличие сухого остатка жидкого стекла в покрытии соотношением (11):

$$m_{\mathcal{E}_i}^{\text{жс}} = \frac{m_{\text{эл}} \cdot K_{\text{МП}}}{(1 + K_{\text{МП}}) \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot \beta}{100}\right)} \cdot \frac{\alpha \beta}{100} \cdot \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_{\text{жс}}}{100} \cdot \frac{M_{\mathcal{E}_i}}{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}} \quad (11)$$

Выражая в уравнении (7) все массы через массу электрода, включив в уравнение величины  $K_1^{\mathcal{E}_i}$ ,  $K_2^{\mathcal{E}_i}$  и  $K_3^{\mathcal{E}_i}$ , а также коэффициенты потерь металла и шлака, вывели уравнение для расчета массы компонента  $\mathcal{E}_i$  в металлической ванне. Аналогично получили выражение для расчета массы оксида компонента  $\mathcal{E}_i$  в шлаковой ванне.

Объединив полученные выражения в систему уравнений с тремя неизвестными, появляется возможность определить парциальные коэффициенты перехода:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\eta}_{\mathcal{E}_i} = a \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}} + b \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ф}} + c \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + b(1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + c \cdot K_3^{\mathcal{E}_i}, \\ m_{\mathcal{E}_i} = \frac{m_{\text{эл}} (1 - K_{\text{пот}}^{\text{мс}})}{1 + K_{\text{МП}}} \times \\ \times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}}{100} (1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + \frac{K_{\text{МП}}}{1 + \frac{\alpha \beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} (1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + \left[ \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha \beta}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_{\text{св}}}{100} \right] \frac{M_{\mathcal{E}_i}}{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}} K_3^{\mathcal{E}_i} \right\} \\ m_{\mathcal{E}_{in} O_m} = m_{\text{эл}} \frac{1 - K_{\text{пот}}^{\text{шл}}}{1 + K_{\text{МП}}} \times \\ \times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}}{100} \frac{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}}{M_{\mathcal{E}_i}} K_2^{\mathcal{E}_i} + \frac{K_{\text{МП}}}{1 + \frac{\alpha \beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} \frac{M_{\mathcal{E}_{in} O_m}}{M_{\mathcal{E}_i}} K_1^{\mathcal{E}_i} + \left( \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha \beta}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_{\text{св}}}{100} \right) (1 - K_3^{\mathcal{E}_i}) \right\} \end{array} \right. \quad (12)$$

где  $m_{\mathcal{E}_i}$  – масса элемента  $\mathcal{E}_i$  в металлической ванне, кг;  $m_{\text{эл}}$  – масса расплавленного электрода, кг;  $K_{\text{пот}}^{\text{мс}}$ ,  $K_{\text{пот}}^{\text{шл}}$  – 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.%;

$(\text{Э}_{in}O_m)_{CB}$  – концентрация оксида  $\text{Э}_{in}O_m$  в жидком стекле, 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;  $\alpha$  – содержание связующего (жидкого стекла) в покрытии электрода, мас.%;  $\beta$  – массовая доля сухого остатка связующего.

Анализ системы уравнений (12) показывает, что для ее решения кроме справочных данных, необходимо определение отдельных величин из специально поставленных экспериментов. Эта информация положена в основу разработки методики проведения экспериментов и обработки их результатов (глава 3).

Разработали математическую модель формирования металла шва. Сварной шов формируется (рис. 1) смешением наплавленного и основного металла (13).

$$[\text{Э}_i]_{\text{шов}} = [\text{Э}_i]_{\text{о.м.}} \cdot \gamma_{\text{о.м.}} \cdot \eta_{\text{Э}_i}^{\text{о.м.}} + [\text{Э}_i]_{\text{н.м.}} \cdot \gamma_{\text{н.м.}} \quad (13)$$

где  $[\text{Э}_i]_{\text{шов}}$  – концентрации элемента  $\text{Э}_i$  в металле шва при однослойной наплавке по результатам химического анализа, мас.%;  $[\text{Э}_i]_{\text{о.м.}}$  – концентрации элемента  $\text{Э}_i$  в основном металле по результатам химического анализа, мас.%;  $[\text{Э}_i]_{\text{н.м.}}$  – концентрации элемента  $\text{Э}_i$  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  $\gamma_{\text{о.м.}} + \gamma_{\text{н.м.}} = 1$ ;  $\eta_{\text{Э}_i}^{\text{о.м.}}$  – парциальный коэффициент перехода элемента  $\text{Э}_i$  из основного металла в металл шва.

Выражение (14) позволяет оценить усредненный коэффициент перехода элемента  $\text{Э}_i$  в металл шва при ручной дуговой сварке покрытыми электродами.

$$\eta_{\text{Э}_i}^{\text{шов}} = \frac{[\text{Э}_i]_{\text{шов}}}{[\text{Э}_i]_{\text{н.м.}} \cdot \gamma_{\text{н.м.}} + [\text{Э}_i]_{\text{о.м.}} \cdot \gamma_{\text{о.м.}}} \quad (14)$$

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

Проверка адекватности модели обычно преследует две цели: оценить реалистичность принятых при моделировании гипотез и оценить точность полученных результатов и их соответствие решаемым задачам.

По разработанной модели был сделан расчет усредненных коэффициентов перехода элементов для 10 марок электродов с различным типом покрытия.

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.

**В третьей главе** приведена методика расчетно-экспериментального определения коэффициентов перехода элементов при ручной дуговой сварке

покрытыми электродами.

Для проведения 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: для электродов с основным типом покрытия – УОНИ 13/45 и УОНИ 13/55; для рутиловых – МР-3.

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.

Для проведения экспериментов была скомпонована установка, состоящая из источника питания Штурм Lorch X350, измерительного блока БИ-01 (Selma) и механизма перемещения Noboruder NB-2SV. Установка обеспечивала 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).

Для оценки химического состава наплавленного металла и металла шва использован фотоэлектрический спектральный анализ по ГОСТ 18895-97. Концентрации компонентов в шлаке определяли с помощью гравиметрического, фотометрического и атомно-абсорбционного анализов. Доля участия основного металла была определена с помощью макроскопического анализа.

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.

Данные экспериментов после обработки позволили представить результаты в виде, удобном для дальнейшего использования (табл. 1 - 3).

Таблица 1 – Результаты эксперимента с электродами УОНИ 13/45

Вычисляемая величина	Формула	Результат		
		Ø=4 мм, K <sub>мп</sub> =0,38		
Сварочный ток, А	I <sub>св</sub>	130	145	160
Напряжение дуги, В	U <sub>д</sub>	24,5	24,5	23,8
Мощность дуги, Вт	P <sub>д</sub>	3185	3560	3800
Масса наплавленного металла $m_{напл}^{ме}$	$m_{н-шл} - m_{пл}$	6,6	13,75	11,4
Масса наплавленного шлака $m_{шлака}^{шлака}$	$m_{н-бр} - m_{н-шл}$	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

Таблица 2 – Результаты эксперимента с электродами УОНИ 13/55

Вычисляемая величина	Формула	Результат					
		Ø=3 мм, K <sub>мп</sub> =0,45			Ø=4 мм, K <sub>мп</sub> =0,38		
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 $m_{шлака}^{шлака}$	$m_{н-бр} - m_{н-шл}$	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 – Результаты эксперимента с электродами МР-3

Вычисляемая величина	Формула	Результат		
		Ø=4 мм, K <sub>мп</sub> =0,44		
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 $m_{шлака}^{шлака}$	$m_{н-бр} - m_{н-шл}$	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

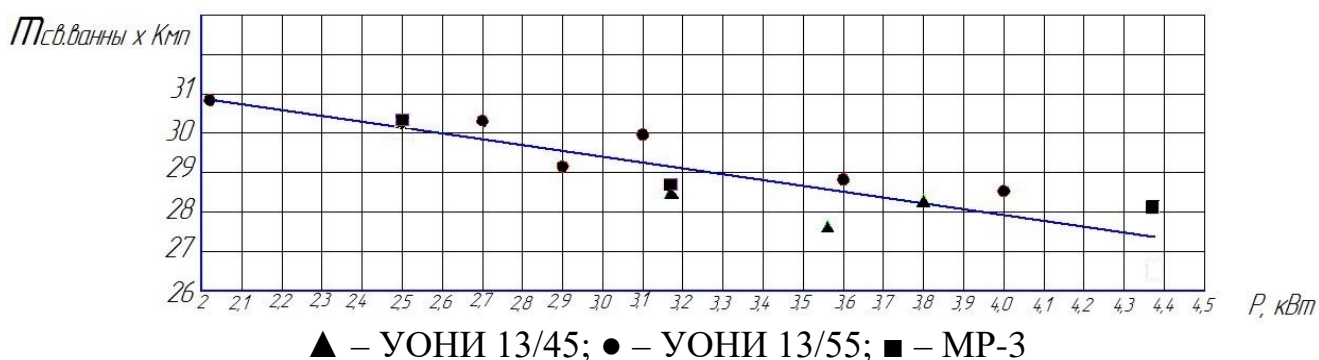


Рисунок 2 – Зависимость произведения массы металлической сварочной ванны и коэффициента массы покрытия от мощности дуги

По приведенным данным была построена графическая зависимость (рис. 2), позволившая получить регрессионное уравнение:

$$m_{\text{св.ванны}} \cdot K_{\text{МП}} = 34,28 - 1,59 \cdot P \quad (15)$$

Аналогично были обработаны результаты по зависимости массы шлаковой ванны от параметров режима и характеристик электродов (16):

$$m_{\text{шл.ванны}} = (59,19 - 5,35 \cdot P) \cdot K_{\text{МП}} \quad (16)$$

Обработка полученных данных позволила найти зависимости коэффициентов потерь металла и шлака (17, 18):

$$K_{\text{пот}}^{\text{ме}} = 1,3 \cdot K_{\text{МП}} + 0,036 \cdot P - 0,592 \quad (17)$$

$$K_{\text{пот}}^{\text{шл}} = 1,364 \cdot P / S - 0,282 \quad (18)$$

Согласно разработанным физической и математической моделям определили усредненные и парциальные коэффициенты перехода элементов отдельно для наплавленного металла (табл. 4) и металла шва.

Таблица 4 – Уравнения для расчета усредненных и парциальных коэффициентов перехода элементов для всех исследованных марок электродов

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

Для однослойной наплавки были определены парциальные коэффициенты перехода элементов из основного металла (13), а также усредненные коэффициенты перехода элементов в металл шва (14).

Таким образом, разработанный расчетно-экспериментальный метод дает возможность оценить усредненные и парциальные коэффициенты перехода элементов в наплавленный металл и металл шва в зависимости от параметров режима сварки. Полученные регрессионные уравнения позволяют рассчитать состав металла при любых заданных параметрах режима.

**В четвертой главе** приведена методика совершенствования состава покрытия сварочных электродов и ее экспериментальная проверка.

Из системы уравнений (12) было выведено соотношение (19), которое показывает материальный баланс каждого элемента в металлической фазе:

$$m_{\text{Э}_i} = m_{\text{ЭЛ}} \frac{1 - K_{\text{пот}}^{\text{ме}}}{1 + K_{\text{МП}}} \times \left\{ \frac{[\text{Э}_i]_{\text{СТ}}}{100} (1 - K_2^{\text{Э}_i}) + \frac{K_{\text{МП}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{ фер}_k}{100} \frac{[\text{Э}_i]_k}{100} (1 - K_1^{\text{Э}_i}) + \left[ \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\text{Э}_{in} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\text{Э}_{in} O_m)_{\text{СВ}}}{100} \right] \frac{M_{\text{Э}_i}}{M_{\text{Э}_{in} O_m}} K_3^{\text{Э}_i} \right) \right\} \quad (19)$$

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

Рассмотрим условия применимости уравнения (19) 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 (19), задается через концентрацию элемента (необходимую или желаемую) и может быть найдена по выражению (1). 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 (17) и парциальных коэффициентов перехода элементов (табл. 4) можно найти указанные величины и подставить их в уравнение (19).

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 (19) необходимо получить для каждого легирующего элемента. Число уравнений (19) 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  $[\mathcal{E}_i^{\text{HM}}]$  (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 (15) рассчитать массу наплавленного металла (г).

8. Рассчитать массу данного элемента в наплавленном металле (г) по уравнению (20):

$$m_{\mathcal{E}_i} = m_{\text{св.ванны}} \frac{[\mathcal{E}_i^{\text{HM}}]}{100}. \quad (20)$$

9. Задать марку проволоки для изготовления стержня сварочного электрода.

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

11. Вычислить значения коэффициента потерь металла ( $K_{\text{пот}}^{\text{ме}}$ ) по уравнению (17).

12. По уравнениям, приведенным в таблице 4, 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 (21):

$$\beta = 0,59 \cdot P + 0,028 \cdot m - 0,535, \quad (21)$$

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

15. Подставить полученные данные в уравнение (19) 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 (19) принять содержание оксидных компонентов  $\sum_{j=1}^i \% j \frac{(\mathcal{E}_{in} O_m)_j}{100}$ , как в исходных электродах.

17. Из уравнения (19) для каждого легирующего элемента найти величину  $A_{\mathcal{E}_i}$ . Величина  $A_{\mathcal{E}_i}$  представляет собой суммарное количество каждого легирующего элемента, введенного в покрытие электрода через ферросплав (22):



$$A_{\Theta_i} = \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{ фер}_k}{100} \frac{[\Theta_i]_k}{100} \quad (22)$$

18. Рассчитать количество ферросплавов в покрытии электродов.

Для этого необходимо выбрать марки ферросплавов, которые предполагают ввести в покрытие электродов. Подставить в уравнение (22) 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 (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 (23)

$$m_{\text{ФЕР}_k} = m_{\text{ЭЛ}} \frac{1 - K_{\text{пот}}^{\text{мс}}}{1 + K_{\text{МП}}} \cdot \frac{K_{\text{МП}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \cdot \frac{\% \text{ фер}_k}{100}. \quad (23)$$

20. Рассчитать суммарную массу легирующих компонентов покрытия (ферросплавов) по выражению (24):

$$m_{\text{Л}} = \sum m_{\text{ФЕР}_k} \quad (24)$$

21. Рассчитать массу шлакообразующей части покрытия по уравнению (25):

$$m_{\text{Ш}} = \frac{K_{\text{МП}}(100 - m_{\text{Л}})}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} - m_{\text{Л}}, \quad (25)$$

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

22. Зная  $m_{\text{Л}}$ ,  $m_{\text{Ш}}$  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.

23. Рассчитать новое значение коэффициента массы покрытия  $K_{\text{МП}}$  по уравнению (26). Значение массы сухого остатка жидкого стекла использовать из базового варианта.

$$K_{\text{МП}} = \frac{m_{\text{Л}} + m_{\text{Ш}} + m_{\text{С}}}{100 - m_{\text{Л}}} \quad (26)$$

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

Оценить необходимость повторного расчета по пунктам 14 - 23 можно из сравнения величин  $K_{\text{МП}}$ , 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.

Применение данной методики было показано на примере совершенствования состава шихты электродного покрытия для электродов УОНИ 13/45. Результат расчета приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнение расчетного и нормативного состава шихты

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

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, по результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

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

## 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 металл и металл шва при подготовке бакалавров и магистров по направлению 150700 «Машиностроение».

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. 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 (0,28 п.л./0,14 п.л.).

2. 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 (0,22 п.л./0,11 п.л.).

3. 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 Metallurgy. Том 15. – 2015. – № 1. – С. 88–90 (0,16 п.л./0,08 п.л.).

4. Вотинова Е.Б. Моделирование процесса формирования состава наплавленного металла при ручной дуговой сварке / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 6: в 2 ч. – 2015. – Ч.2. – С. 134–143 (0,56 п.л./0,28 п.л.).

#### **Публикации в других изданиях:**

5. Votina, E. Possibilities of Software for Welding Manufacture / O. Ogorodnikova, M. Shalimov // The Fifth International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2008), Ariel University Center of Samaria, Ariel, Israel. September 08–12, 2008. Volume 1. P.2-170 – 2-179 (0,55 п.л./0,25 п.л.).

6. Вотинова, Е.Б. Современное состояние прогнозирования химического состава и свойств металла шва при РДС / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Научные труды XVI Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники: сборник статей. В 4 ч. Ч. 2. Екатеринбург. – 2009. – С. 339–340 (0,12 п.л./0,06 п.л.).

7. Вотинова, Е.Б. Физическая модель процесса сварки покрытыми электродами или порошковой проволокой / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Сварка: наука, практика, образование: сборник докладов научно-технической конференции «Сварка. Контроль и диагностика». Екатеринбург. – 2009. – С. 17–19 (0,16 п.л./0,08 п.л.).

8. Вотинова, Е.Б. Оценка коэффициентов перехода элементов при сварке покрытыми электродами по расчетным и экспериментальным данным / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Сварка: наука, практика, образование: сборник докладов научно-технической конференции "Сварка. Диагностика и контроль". Екатеринбург. – 2010. – С. 142–146 (0,28 п.л./0,14 п.л.).

9. Вотинова, Е.Б. Оценка коэффициентов перехода элементов при сварке покрытыми электродами / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Сборник докладов международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию сварочного производства ОАО «НПК «Уралвагонзавод». Нижний Тагил. – 2011. – С. 33–35 (0,16 п.л./0,08 п.л.).

10. Вотинова, Е.Б. Определение парциальных коэффициентов перехода элементов при сварке покрытыми электродами / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов, И.В. Булатов // Сварка и диагностика: сборник докладов научно-технической конференции в рамках 11 Международной специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика». Екатеринбург. – 2011. – С. 33–41 (0,5 п.л./0,25 п.л.).

11. Вотинова, Е.Б. Методика расчета состава металла шва при ручной дуговой сварке через парциальные коэффициенты перехода / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Станочный парк. – 2012. – № 5 (93). – С. 88–92 (0,28 п.л./0,14 п.л.).

12. Вотинова, Е.Б. Экспериментальное определение парциальных коэффициентов перехода элементов при ручной дуговой сварке / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Инженерная мысль машиностроения будущего: сборник материалов Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием. Екатеринбург. – 2012. – С. 120–122 (0,16 п.л./0,08 п.л.).

13. Вотинова, Е.Б. Применение расчетных методов для оптимизации состава электродных покрытий / Е.Б. Вотинова // Труды международного конгресса «Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов». Екатеринбург. – 2012. – С. 539–540 (0,12 п.л./0,06 п.л.).

14. Вотинова, Е.Б. Моделирование процессов взаимодействия металла и шлака при ручной дуговой сварке / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Сварка и диагностика: сборник докладов научно-технической конференции. Екатеринбург. – 2012. – С. 57–61 (0,5 п.л./0,25 п.л.).

15. Шалимов, М.П. Расчет усредненного и парциальных коэффициентов перехода углерода и марганца при ручной дуговой сварке / М.П. Шалимов, Е.Б. Вотинова // Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума в рамках 14 специализированной выставки «Сварка. Контроль и диагностика». Екатеринбург. – 2014. – С. 64–68 (0,28 п.л./0,14 п.л.).

16. Вотинова, Е.Б. Оценка парциальных коэффициентов перехода углерода при ручной дуговой сварке / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени: VIII международная научно-практическая конференция. Екатеринбург. – 2015. – № 3(8). – С. 150–152 (0,16 п.л./0,08 п.л.).

17. 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 (0,61 п.л./0,3 п.л.).

18. 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 (0,46 п.л./0,23 п.л.).