

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
общеобразовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи



Лукьянчук Александр Владимирович

**РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТОВ ОБМАЗКИ  
ПОКРЫТЫХ НАПЛАВОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ  
НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Направление подготовки  
15.04.01 - «Машиностроение»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Среднева Татьяна Ивановна
<b>Проверено</b>
25.06.2021 Зачтено Библиотека

2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольском-на-Амуре государственном университете»

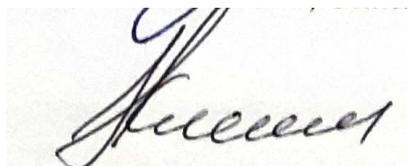
Научный руководитель: кандидат технических наук,  
профессор кафедры «Технология сварочного  
и металлургического производства»  
ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре  
государственного университета»,  
Соболев Борис Михайлович

Рецензент: кандидат технических наук, доцент,  
старший научный сотрудник  
ИМиМ ДВО РАН  
Жилин Сергей Геннадьевич

Защита состоится 24 июня 2021 г. в 09:00 часов на заседании государственной аттестационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: Россия, 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, учебный корпус 2, аудитория 221/2.

Автореферат разослан 16 июня 2021 г.

Секретарь ГЭК  
к.т.н., доцент



О.Н. Клешнина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Стратегическим направлением материаловедения современного периода в условиях интеграции экономики России в международное экономическое пространство является получение новых материалов с повышенными физико-химическими и эксплуатационными свойствами. Не менее важное значение имеет разработка ресурсосберегающих, экологически чистых, экономически целесообразных технологий их получения. Это касается и сварочно-наплавочных технологий, широко используемых в промышленности, строительстве, на транспорте при создании, эксплуатации и ремонте технических устройств.

В настоящее время, при восстановлении повсеместное предпочтение отдается электрической сварке плавящимися электродами, которая позволяет производить не только монтажные операции, но и формировать на изношенных поверхностях изделий покрытия с требуемыми эксплуатационными свойствами. К примеру, на железных дорогах России доля сварочных работ при изготовлении и ремонте конструкций (локомотивов, вагонов, верхнего строения пути и др.) составляет более 50 % всех операций. При этом очень широко используется ручная дуговая сварка и наплавка, которая, несмотря на ряд недостатков, является универсальной и мобильной; дает возможность восстанавливать изделия с трещинами незначительной протяженности, расположенных в труднодоступных местах; наплавлять малые площади износов и т.д.

Новым направлением в области легирования наплавленных поверхностей при электрической дуговой сварке является создание высокоэффективных флюсов и покрытий электродов с комплексным использованием многокомпонентного минерального сырья, содержащего оксиды легирующих элементов, без его глубокой технологической переработки.

Работы ведущих ученых – сварщиков (Е.О.Патона, Б.И. Медовара, Б.Д.Мальшева, А.А.Ерохина, А.И.Акулова, Г.А. Николаева, Г.Л. Петрова, К.К. Хренова И.В. Зуева и других) и материаловедов (Н.П. Лякишева, Ю.В. Цветкова, Г.В. Самсонова, А.Д. Верхотурова, Г.П. Швейкина, В.А. Резниченко, И.А. Подчерняевой, Э.Г. Бабенко, Ри Хосена, Макиенко В.М. и др.) позволили получить ряд существенных результатов. Однако представления о формировании высококачественных легированных покрытий на основе комплексного использования минерального сырья далеки от завершенности и требуют своего дальнейшего развития. Особенно это важно для Дальневосточного экономического региона, где сосредоточено наибольшее в России количество россыпных и коренных месторождений ряда ценных минералов, в процессе обогащения которых образуются многокомпонентные концентраты, уникальные по своему минералогическому и химическому составу. Решение указанной проблемы дало бы возможность получения электродных покрытий на основе такого сырья с последующим формированием наплавленных поверхностей изделий с высоким уровнем физико-химических и эксплуатационных свойств.

Актуальность работы определяется важной, имеющей существенное значение для экономики страны задачей создания прогрессивных, экологически чистых,

энергосберегающих и безотходных технологий при электродуговой сварке и наплавке с применением минерального сырья в качестве легирующих материалов.

**Целью работы** является разработка и создание наплавочных электродов с покрытиями на основе вольфрамсодержащего минерального сырья.

**Задачи исследования:** в соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- изучение эффективных методов синтеза шихты электродных покрытий на основе минерального сырья, содержащего оксиды легирующих элементов;
- разработка технологической схемы и создание легирующих электродов на основе минерального сырья, содержащего оксиды легирующих элементов, без его глубокой технологической переработки;
- исследование взаимосвязей состава, структуры и свойств легированных слоев, полученных при электрической сварке с использованием разработанных электродов.

**Достоверность** экспериментальных результатов и обоснованность выводов обеспечиваются корректностью постановки задач исследования, комплексным подходом к их решению с использованием современных методов и методик, анализом литературных данных и критическим сопоставлением установленных в работе закономерностей фактам, полученным другими исследователями.

**Основные научные положения, защищаемые автором:**

- математическая модель, алгоритм и технология получения легированных покрытий при ручной дуговой сварке и наплавке на основе многокомпонентных минеральных ассоциаций;
- состав покрытий электродов из минерального сырья Дальневосточного региона, позволяющий наплавлять на изделиях поверхности с содержанием вольфрама до 14 %.

**Научная новизна:**

- изучены закономерности легирования наплавляемого металла при ручной дуговой сварке электродами с покрытиями из минерального сырья, содержащего оксиды легирующих элементов, позволяющие оптимизировать массовый состав шихты таких покрытий;
- сформулированы научно-обоснованные решения по синтезу шихты электродных покрытий, заключающиеся в непосредственном использовании минерального сырья, содержащего оксиды легирующих элементов.

**Личный вклад автора** состоит в постановке задачи исследования, в проведении экспериментальных исследований с последующим анализом и обработкой полученных данных.

**Практическая значимость работы:**

- разработаны наплавочные электроды для ручной дуговой сварки на основе шеелитового концентрата, позволяющие получать сплавы специального назначения с содержанием вольфрама до 14 %;
- разработаны наплавочные электроды для ручной дуговой сварки с добавками шеелитового концентрата, позволяющие получать покрытия с содержанием вольфрама 2-7 %, обладающие высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы докладывались на: международном симпозиуме "Принципы и процессы создания неорганических материалов" (Третьи Самсоновские чтения) (Хабаровск, 12-15 апреля 2006 г.); региональной научно-технической конференции творческой молодежи "Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования" (Хабаровск, 18-19 апреля 2006 г.).

**Публикации.** Основные материалы исследований опубликованы в 10 печатных работах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов, списка литературы. Содержит 98 страниц машинописного текста, включая 15 таблиц, 29 рисунков и список литературы из 122 источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные положения выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

**В первом разделе** приведены особенности формирования состава, структуры и свойств наплавленного металла при ручной дуговой сварке и наплавке, рассмотрены методологические и технологические проблемы получения легирующих сварочно-наплавочных электродов, изложены основные концепции создания электродных покрытий с использованием многокомпонентных минеральных ассоциаций, содержащих оксиды легирующих элементов, без выделения последних в чистом виде.

Анализ литературных источников показал, что в последние годы все больший интерес материаловедов привлекает использование природных минеральных ассоциаций в качестве исходных компонентов при производстве новых материалов, в том числе и сварочно-наплавочных. Изучению проблем комплексного использования минерального сырья для создания последних и формированию на их основе покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами внимания уделяется недостаточно. Работы в этом направлении носят единичный характер.

Результаты изучения технологий и особенностей сварочных металлургических процессов позволили установить, что при ручной сварке и наплавке материал сердечника электрода от начала его плавления и до полной кристаллизации постоянно находится в контакте с жидким шлаком, образующимся при плавлении электродных покрытий, защищающих металл сварочной ванны от вредного воздействия воздушной среды и обеспечивающим его металлургическую обработку. Высокий градиент температур и большое накопление тепла в ограниченном объеме позволяет легировать металл элементами, находящимися в шлаке и использовать для легирования не чистые металлы, а ассоциации, в составе которых, кроме оксидов легирующих элементов, имеются компоненты, обеспечивающие качественную реализацию технологического процесса.

Наш основной тезис создания легирующих электродных покрытий базируется на исследовании системы "технология-сырье-материал". Актуальность такого тезиса наглядно видна на примере Дальневосточного экономического района, обладающего значительными запасами минерального сырья, пригодного для произ-

водства легирующих электродов, но не имеющего необходимой базы для его переработки. Поэтому наиболее прогрессивным решением следует считать разработку и внедрение относительно простых технологий получения электродов с покрытиями из вырабатываемого горно-обогатительными комбинатами сырья, без его глубокой затратной технологической переработки.

**Во втором разделе** изложена методика синтеза легирующих электродных покрытий на основе минерального сырья, содержащего оксиды легирующих элементов. Приведены характеристики исходных материалов и оборудования, используемых в исследованиях.

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время общепринятые методики по созданию электродов с легирующими покрытиями отсутствуют. Большинство работ основывается на изучении квазиравновесных физико-химических процессов, формирующих равновесные структуры в условиях стремления системы к минимуму свободной энергии. В тоже время сведения о термодинамических свойствах компонентов сложных шлаковых систем практически отсутствуют. Обычно имеются сведения только о высокотемпературных термодинамических свойствах чистых элементов и об их активности в шлаковых системах.

Решение задачи создания новых материалов при ручной дуговой сварке и наплавке основывается на более привлекательном, на наш взгляд, подходе, сформулированном доктором технических наук, профессором Э.Г. Бабенко и базирующийся на анализе кибернетической системы, в которой шлаковая ванна представляет собой множество элементов, находящихся между собой и окружающей средой в тесной и сложной взаимосвязи, т.е. влияние шлаковой системы на свойства наплавленного металла рассматривается комплексно, на основе экспериментов. В отличие от принятой практики, когда прогнозирование свойств ведется по одному-двум легирующим элементам, решать эту задачу предлагается экспериментально-статистическими методами, позволяющими при неполном знании механизмов явлений, происходящих в сложной шлаковой ванне, строить и анализировать математические модели, которые связывают свойства со всеми теми переменными, от которых эти свойства зависят, то есть первоосновой является анализ структурных составляющих системы "технология – сырье – легирующие электроды – наплавленный металл" и принцип комплексного использования минерального сырья, содержащего оксиды легирующих элементов.

При ручной дуговой сварке при расплавлении электродного покрытия образуется шлаковая ванна, которая защищает жидкий металл от внешней среды, поддерживает на необходимом уровне технологические характеристики сварочного процесса, участвует в формировании состава, структуры и свойств наплавленного металла, дает возможность легировать переплавляемый металл сердечника, что является одним из определяющих факторов при получении новых сплавов и покрытий.

Многокомпонентный состав шлаковой ванны обуславливает ее многофункциональность и многовариантность взаимодействий, как между ее составляющими, так и с элементами электродного и основного материала.

Ведущая роль в системе отводится жидкому шлаку и расплавленным основ-

ному и электродному металлам с определенным набором химических элементов, активность которых зависит от температуры и времени протекания реакций.

В отличие от принятой практики, когда прогнозирование ведется по одному – двум чистым легирующим элементам, использование экспериментально-статистических методов позволяет при неполном знании механизмов явлений, происходящих в сложной сварочной ванне, строить и анализировать математические модели, связывающие свойства со всеми теми переменными, от которых эти свойства зависят, а по результатам анализа прогнозировать параметры создаваемого материала.

Решение задачи осуществлялось по методике, блок-схема которой представлена на рисунке 1. В упрощенном виде она рассматривает аналитическую цепь "технология – сырье – покрытия электродов – сплавы" и включает шесть этапов: постановку задачи; выбор минерального сырья для синтеза шихты электродных покрытий; исследование и выбор наиболее значимых компонентов; разработку и исследование опытной партии электродов; разработку математической модели системы "состав шихты покрытий – свойства наплавленного материала"; получение (с использованием разработанных электродов) легированных наплавленных слоев с прогнозируемыми свойствами.



Рисунок 1 - Блок-схема создания сварочно-наплавочных электродов

Отмеченная методика дает возможность учитывать при синтезе шихты покрытий значительное число входных параметров. Однако, увеличение последних ведет к существенному возрастанию количества предварительных экспериментов. Для объективного отображения результатов исследования необходимо, чтобы модель формирования шихты включала только те входные факторы, которые оказывают наиболее существенное влияние на свойства наплавляемых покрытий, т.е. на выходные параметры.

При исследовании крайне сложных процессов, реализуемых в сварочной ванне, приходится учитывать значительное число входных параметров, оказывающих влияние на свойства получаемого сплава, причем степень влияния этих факторов различна и зачастую лишь небольшое их число оказывает существенное воздействие на выходные параметры. Поэтому проблема состоит в том, чтобы выделить и идентифицировать доминирующие факторы на "шумовом фоне" всех остальных.

Для решения подобной задачи предлагается использовать методы, которые позволяют выявить существенные факторы с помощью относительно небольшого числа экспериментов. К их числу относятся, например, метод анализа априорной информации и ранжирования факторов по степени их влияния на выходную величину.

При решении задач прогнозирования свойств получаемых швов и покрытий при ручной электрической сварке легирующие шлаковые системы на основе многокомпонентных минеральных ассоциаций описывались формулой линейной регрессии 3-ей степени. Проверка адекватности математического описания осуществлялась по критерию Фишера (F-критерию).

Обработка экспериментальных данных и построение контурных кривых поверхностей откликов производилось с помощью прикладных программ Microsoft Excel, Maple и Mathcad.

Для проведения исследований использовалось как типовое, так и специально изготовленное оборудование и оснастка.

**Третий раздел** посвящен разработке легирующих электродов для ручной дуговой наплавки. Исследовано влияние различных восстановителей и относительной массы покрытия на переход вольфрама из шеелитового концентрата в наплавляемый металл. Установлены функциональные зависимости свойств получаемого материала от состава покрытия электрода и его относительной массы.

При создании электродов на основе шеелитового концентрата использовались восстановители (ферросилиций, алюминий, графит), оказавшиеся наиболее эффективными при электрошлаковом переплаве. Экспериментальная проверка разработанных электродов показала, что в условиях ручной дуговой наплавки (в отличие от электрошлакового переплава) наиболее эффективным восстановителем вольфрама, находящегося в составе покрытия шеелитового концентрата, является графит. Это связано значительными отличиями микрометаллургических процессов, протекающих в сварочных ваннах при ручной и электрошлаковой технологиях, что соответствует результатам многочисленных исследований В.Г. Самсонова, А.Д. Верхотутова, И.А. Подчерняевой и других авторов, доказавших существенное влияние технологии на состав и свойства получаемого материала. Далее в порядке снижения восстановительных способностей следуют алюминиевая пудра и ферросилиций.

Для оценки эффективности восстановления вольфрама из шеелитового концентрата нами был введен условный параметр восстановления  $\Pi_{восст} = W_{напл} / W_{пр}$ , рассчитанный как отношение массовых долей вольфрама в наплавленном  $W_{напл}$  и присадочном  $W_{пр}$  материалах. При его определении условно принималось, что наплавляемые слои формируются за счет присадочного материала, который

включает в себя металл сердечника электрода и вольфрам, присутствующий в покрытии электрода.

При использовании в качестве восстановителя ферросилиция в количестве 7-9 % параметр восстановления достигает 0,46-0,48. С применением 9-11 % алюминиевой пудры  $P_{восст}=0,54-0,56$ , что на 14 % выше, чем в электродах с ферросилицием. Однако наиболее высокие значения  $P_{восст}$  получены при использовании в качестве восстановителя порошка графита. Так при содержании в шихте покрытия электрода 14-16 % графита параметр восстановления составляет 0,61 - 0,63, что на 11 и 24 % выше, чем с применением, соответственно, алюминиевой пудры и ферросилиция.

Согласно анализу априорной информации и данных ранжирования факторов, влияющих на степень легирования наплавленного металла, помимо типа и доли восстановителя в шихте, значительное влияние оказывает количество в шихте легирующей составляющей.

При производстве электродов для ручной дуговой сварки количество легирующей составляющей в покрытии можно увеличивать либо за счет повышения ее процентного содержания в шихте, либо за счет увеличения относительной массы (толщины) покрытия.

Анализ результатов исследований показал, что относительная масса покрытия электрода существенно влияет на степень легирования наплавленного металла (рисунок 2). Однако при увеличении коэффициента массы покрытия параметр восстановления снижается (рисунок 3). По нашему мнению это обусловлено тем, что одновременно с увеличением толщины покрытия на электроде повышаются затраты энергии для его расплавления.

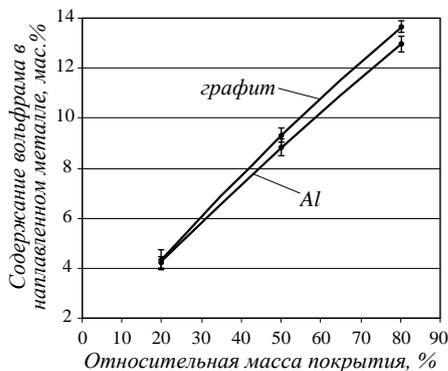


Рисунок 2 - Зависимость содержания вольфрама в наплавленном металле от относительной массы покрытия электродов

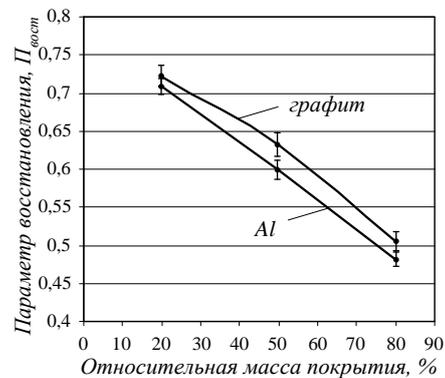


Рисунок 3 - Зависимость коэффициента восстановления вольфрама от относительной массы покрытия электродов

Анализ структуры и свойств полученных покрытий показывает, что сплавы, полученные с использованием электродов на основе шеелитового концентрата, содержащие в качестве восстановителя графит, имеют более высокие физико-механические и эксплуатационные свойства. Это связано с тем, что углерод, восстанавливая вольфрам, дополнительно легирует наплавляемый металл. В результате комплексного легирования низкоуглеродистого присадочного материала вольфрамом и углеродом образуется сплав, состоящий из твердых и износостойких фаз - легированных перлита и цементита, интерметаллидов и карбидов.

Экспериментально доказано, что при увеличении относительной массы покрытия электродов на основе шеелитового концентрата переход вольфрама в наплавляемый металл увеличивается (до 14 %), что дает возможность формировать высоколегированные покрытия с особыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

На следующем этапе исследований устанавливались функциональные зависимости свойств получаемого материала от состава покрытия электрода и его относительной массы.

Сначала были получены функциональные зависимости для электродов на основе шеелитового концентрата. Созданные электроды дают возможность при ручной сварке и наплавке легировать низкоуглеродистую электродную проволоку вольфрамом до 14 % и получать на изделиях покрытия специального назначения.

Как показывает анализ литературы, среди машиностроительных материалов значительную группу составляют специальные стали, имеющие глубокую прокаливаемость, с содержанием вольфрама от 0,5 до 4,0 % и углерода 0,5...0,7 %.

При создании электродов, дающих возможность формировать при сварке и наплавке подобные сплавы за основу шихты покрытий была принята шихта электродов общего назначения из минерального сырья ДВ региона, а в качестве легирующего компонента добавлялась смесь шеелитового концентрата и графита.

При решении задач по установлению математических моделей функций «состав – свойства» создаваемых покрытий в качестве входных переменных факторов принимались количество легирующей добавки ( $x_1$ ), масса покрытия относительно металла сердечника ( $x_2$ ), а в качестве выходных – количество вольфрама ( $y_W$ ), параметр восстановления вольфрама ( $y_{Пвос}$ ), твердость ( $y_{НВ}$ ) и износостойкость наплавленного металла ( $y_{изн}$ ).

Полученные зависимости были использованы для построения контурных кривых поверхностей откликов (рисунок 4), позволяющих решать практические задачи по созданию покрытий электродов, составом которых можно в широких пределах регулировать свойства наплавленного металла и получать с их помощью покрытия и швы с заданными свойствами.

Экспериментальная проверка возможности получения легированных покрытий с прогнозируемыми свойствами проводилась на электродах выбранных по рисунку 4, в состав покрытий которых вводилось 33% легирующей добавки при относительной массе покрытия 43%. Предполагалось получить наплавленный металл с содержанием вольфрама 3,3-3,9 % и твердостью 315-325 НВ.

Изучены химический состав и механические свойства наплавленного металла, приведенные в таблице 1, из которой видно, что количество вольфрама перешедшего из шлаковой ванны составляет 3,39 %. Механические свойства соответствуют прогнозируемым.

Таблица 1 - Химический состав и механические свойства опытного сплава

Химический состав, %						Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Ударная вязкость КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Твердость, НВ
C	Si	Mn	W	S	P			
0,3-0,35	0,536	0,765	3,39	0,02	0,03	588-640	56-58	321

Микроструктура сплава (рисунок 5) представляет собой смесь легированных феррита с  $H_{\mu} = 107-227 \text{ HV}$  и перлита с  $H_{\mu} = 98-274 \text{ HV}$ .

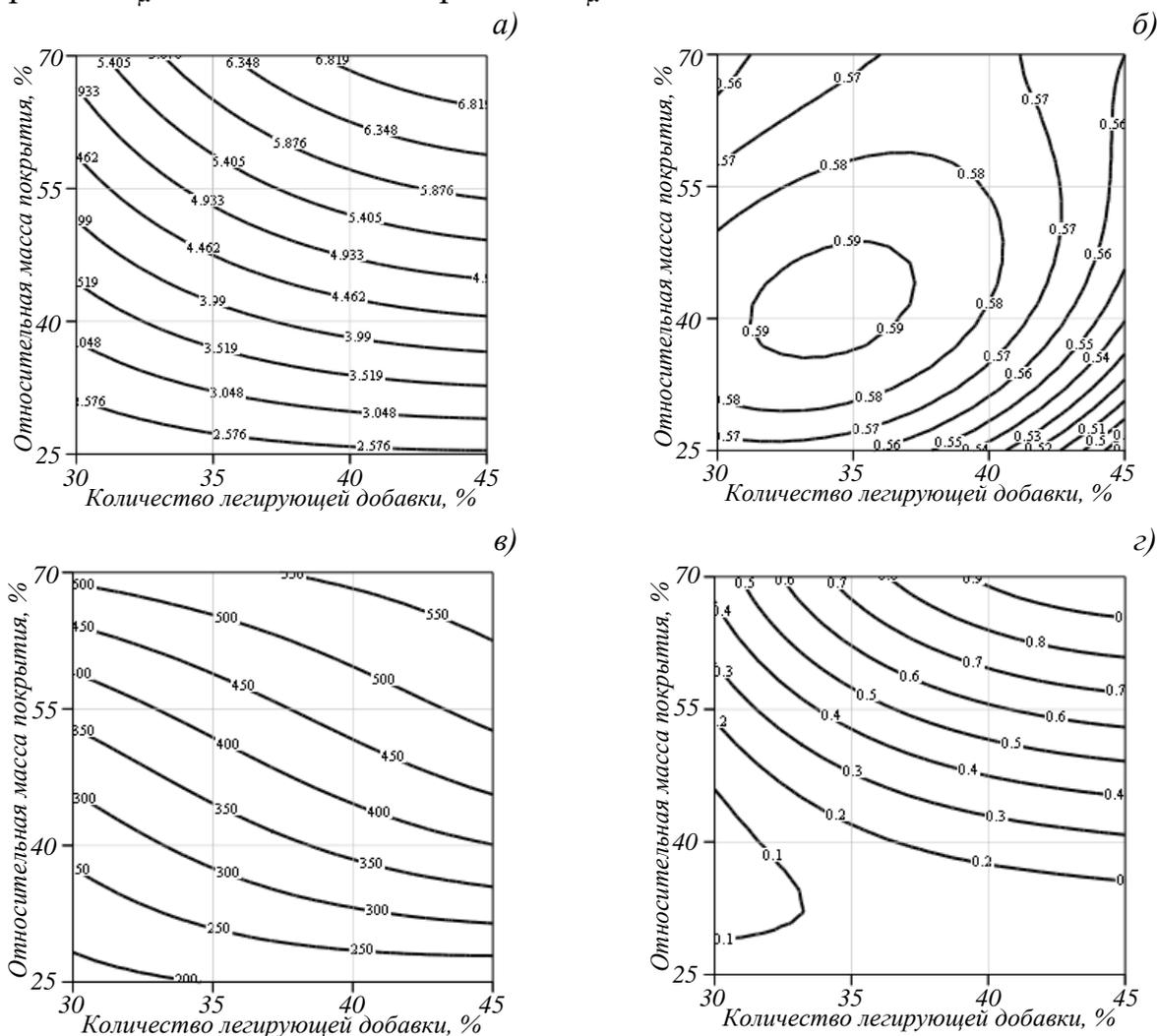


Рисунок 4 - Контурные кривые поверхностей откликов: *а* – содержания вольфрама в наплавленном металле, %; *б* – параметра восстановления вольфрама; *в* – твердости наплавленного металла, НВ; *г* – износостойкости наплавленного металла относительно стали Р18

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что вольфрамсодержащий шеелитовый концентрат может быть использован в качестве легирующей добавки шихты покрытий электродов, с помощью которых можно наплавливать слои с содержанием вольфрама 2-7%, твердостью 200-580 НВ и износостойкостью относительно стали Р18 - 0,123-0,993. При этом в качестве сердечника электрода используется низкоуглеродистая сварочная проволока Св08А, а покрытие практически полностью состоит из минерального сырья Дальневосточного региона, которое не требует какой-либо предварительной технологической переработки.

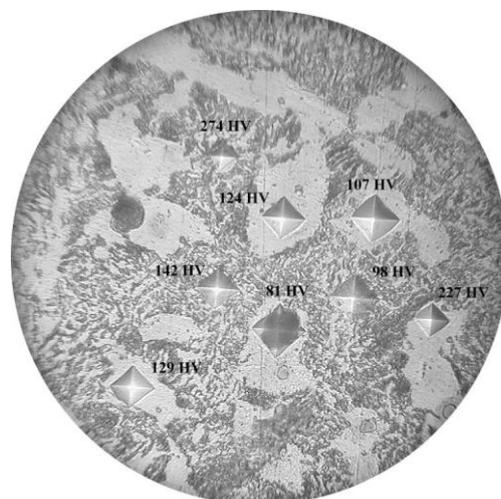


Рисунок 5 - Микроструктура опытного сплава,  $\times 800$

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана и экспериментально подтверждена методика синтеза легирующих электродных покрытий на основе минерального сырья, содержащего оксиды легирующих элементов для создания сварочно-наплавочных материалов.

2. Разработана математическая модель, алгоритм и технология получения легированных покрытий при ручной дуговой сварке и наплавке на основе комплексного использования многокомпонентных минеральных ассоциаций.

3. Проведено сравнительное экспериментальное исследование влияния на переход вольфрама в наплавленный металл различных восстановителей. Установлено, что при ручной дуговой сварке лучшим восстановителем является графит.

4. Создана шихта электродных покрытий электродов из минерального сырья Дальневосточного региона, позволяющая наплавлять на изделиях слои с содержанием вольфрама до 14 %.

Созданы легирующие электроды для формирования покрытий с содержанием вольфрама 2-7 % и повышенными эксплуатационными свойствами на изделиях из конструкционных сталей ( $\sigma_b=500-1000$  МПа, КСЧ=40-60 Дж/см<sup>2</sup>, НВ 200-500).

5. Исследованы химические, структурные и фазовые составы, а также эксплуатационные свойства легированных сплавов, полученных с использованием электродов с покрытиями синтезированными на основе вольфрамсодержащего сырья Дальнего Востока. Установлено, что вольфрам, находящийся в составе шихты, легирует феррит и эвтектоидный цементит электродной стали, образует интерметаллиды  $Fe_2W$ ,  $Fe_3W_2$ , и сложные карбиды  $Fe_3W_3C$ .

6. На основании проведенных исследований предложены технологические основы управления физико-химическими и эксплуатационными свойствами легированных покрытий, получаемых с использованием созданных электродов.

### Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Лукьянчук, А.В. Создание электродов с покрытием на основе вольфрам-титановых концентратов, содержащих оксиды легирующих элементов / А.В. Лукьянчук, Е.А. Лихачев // Вестник Института тяги подвижного состава: материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Повышение эксплуатационной эффективности подвижного состава и технологических машин», посвященной памяти д-ра техн. наук, проф. В.Г.Григоренко (23 ноября 2016 г./ под ред. А.Е. Стецюка – Хабаровск: Изд-во ДВУПС, 2016 –Вып. 12 – 172 с. ил. С. 115-116.

2. Романов, И.О. Формирование износостойких поверхностей рабочих органов путевых машин / И.О. Романов, Е.М. Баранов, Д.Г. Перваков, П.В. Соколов, А.В. Лукьянчук // Ремонт. Восстановление. Модернизация: Москва, издательство: Наука и технологии ООО (Москва), 2017. №3 с.21-25.

3. Макиенко, В.М. Разработка сварочно-наплавочных флюсов на основе минерального сырья Дальневосточного региона / В.М. Макиенко, А.В. Атеняев, П.В. Соколов, А.В. Лукьянчук // Упрочняющие технологии и покрытия. – № 10 (178).– 2019. – С. 442-447.