

На правах рукописи



Перваков Дмитрий Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ
ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель - **Макиенко Виктор Михайлович**, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Гордиенко Павел Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий лабораторией защитных покрытий и морской коррозии Федерального государственного бюджетного учреждения науки, Института химии ДВО РАН.

Комаров Олег Николаевич, кандидат технических наук, доцент, временно исполняющий обязанности директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН.

Ведущая организация - Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ), г. Владивосток

Защита состоится «01» февраля 2019 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Комсомольского-на-Амуре государственного университета и на официальном сайте организации по адресу www.knastu.ru. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту diss.material@yandex.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Проценко Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Важным направлением материаловедения остается разработка и внедрение новых материалов для получения покрытий и методов управления их служебными характеристиками. В настоящее время при изготовлении сварочно-наплавочных материалов, применяют ферросплавы и порошки чистых металлов, но их использование значительно повышает стоимость материалов. Поэтому, на сегодняшний день актуальным остается применение минерального сырья без его глубокой технологической переработки при создании новых материалов. Однако, это обуславливает ряд проблем, связанных с неоднородностью фазового и химического состава исходного сырья, приводящего к неравномерности распределения легирующих элементов в покрытии, невысокой эффективности легирования и, как следствие, снижению эксплуатационных свойств.

Следует отметить, что металлургические процессы в электротермических технологиях (в частности при дуговой сварке) отличаются от обычных, осуществляемых в плавильных печах, тем, что они проходят в малых объемах расплавленного металла, пребывая короткое время в этом состоянии, ограничивая эффективность типовых металлургических методов обработки металла для сохранения его качества.

Перспективным направлением для повышения служебных характеристик покрытий является использование дополнительных технологических методов воздействий на расплав, в которых одновременно используют несколько концентрированных источников энергии. В данной работе предлагается использовать один из наиболее простых и эффективных методов влияния на расплав – это вспомогательная трехфазная дуга косвенного действия, которая является дополнительным источником теплового и электромагнитного воздействия. Вспомогательная дуга способствует перераспределению теплового градиента и увеличению интенсивности перемешивания жидкой фазы, за счет взаимодействия собственных магнитных полей основной и косвенной дуги.

Работа выполнена в соответствии с концепцией социального и экономического развития Хабаровского края до 2025 года № 308 от 15.04.2014 («О приоритетном направлении развития минерально-сырьевой базы региона»).

Тема работы и содержание исследований соответствуют научной специальности ВАК 05.16.09 - Материаловедение (в машиностроении) по пунктам: п.10. Разработка покрытий различного назначения (упрочняющих, износостойких и других) и методов управления их качеством; п.12. Развитие научных основ комплексного использования сырья, местных сырьевых ресурсов и техногенных отходов для получения материалов для строительных изделий и конструкций.

Целью работы является повышение свойств легированных покрытий за счет изменения состава и структуры в условиях дополнительного технологического воздействия.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- теоретическое обоснование возможности использования дополнительного технологического воздействия при электротермических процессах;
- разработка блок-схемы повышения свойств легированного слоя за счет применения вспомогательной дуги косвенного действия при формировании покрытий;
- разработка экспериментального оборудования для проведения исследований;
- оценка эффективности применения вспомогательной дуги косвенного действия с порошковой проволокой, содержащей легирующие элементы в виде ферросплавов, в целях повышения свойств формируемых покрытий;
- исследование влияния дополнительного технологического воздействия на состав, структуру и свойства покрытия при использовании материалов на основе минерального сырья Дальневосточного региона;
- расчет технико-экономической эффективности и промышленная апробация деталей, восстановленных с применением предлагаемой технологии.

Научная новизна работы:

- установлено, что дополнительное технологическое воздействие способствует перераспределению теплового градиента и перемешиванию расплава, что приводит к увеличению перехода легирующих элементов в металл покрытия. Так, при использовании ферросплавов, содержание марганца возрастает на 0,4%, хрома – 1,7%, молибдена – 0,23%, а при использовании минерального сырья (шеелита) на 0,6% вольфрама;
- определены закономерности изменения состава и соотношения структурных составляющих сформированного покрытия, позволяющие прогнозировать свойства в рациональном диапазоне режимов дополнительного технологического воздействия. Так, наибольшее значение твердости (62 HRC) и ударной вязкости (38 Дж/см²) достигается при напряжении на вспомогательной дуге 50-70 В, расстоянии между основной и вспомогательной дугой 4-6 мм, скорости формирования покрытия до 0,6 м/мин;
- доказано, что предлагаемая технология позволяет увеличить содержание сложной карбидной составляющей, которая способствует равномерному распределению и повышению твердости покрытия (от 40 до 60 HRC без снижения ударной вязкости, значения которой находятся в пределах 34-38 Дж/см²).

Практическая значимость работы:

1. Получена диаграмма, позволяющая устанавливать рациональные режимы дополнительного технологического воздействия в зависимости от требуемых свойств покрытия.

2. Предложен метод дополнительного технологического воздействия на расплав, позволяющий повысить свойства формируемых покрытий, а также разработана наплавочная порошковая проволока (патент на изобретение № 2637849), применение которой, совместно с разработанной технологией дополнительного воздействия, позволило увеличить износостойкость формируемых покрытий до 30%. Полученные данные подтверждаются актом опытно-сравнительных испытаний.

3. Оценка экономической эффективности применения разработанной технологии показала, что годовой экономический эффект составляет 533840 руб. (при массе наплавленного металла 573 кг).

На защиту выносятся:

1. Обоснование метода технологического воздействия вспомогательной дугой.

2. Математические зависимости и результаты исследований параметров вспомогательной дуги.

3. Результаты исследования воздействия вспомогательной дуги на состав, структуру и свойства покрытий, сформированных порошковой проволокой с сердечником, содержащим легирующие элементы в виде ферросплавов.

4. Результаты исследований использования вспомогательной дуги при формировании покрытий материалами на основе минерального сырья Дальневосточного региона.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием известных теоретических разработок и современных методов определения состава, структуры и свойств материала в аттестованных лабораториях, экспериментальными исследованиями, полученными автором, а также положительными результатами стендовых и эксплуатационных испытаний.

Апробация работы.

Основные результаты исследований были представлены: на международном симпозиуме «Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы» (Комсомольск-на-Амуре, 12–16 мая 2015 г.); седьмой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 29 марта – 1 апреля 2016 г.); международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» (Санкт-Петербург, 14–15 апреля 2016 г.); всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием «Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» (Хабаровск, 20–22 апреля 2016 г.); всероссийской

научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием «Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» (Хабаровск, 17—19 апреля 2018 г.).

Автор выражает благодарность заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук, профессору Ри Хосену, доктору технических наук, профессору Бабенко Э.Г., кандидатам технических наук Романову И.О., Лихачеву Е.А. и другим сотрудникам кафедры «ТТК» ФГБОУ ВО «ДВГУПС» за оказанную помощь в постановке и проведении экспериментов, консультации при написании и представлении диссертационной работы к защите.

Публикации.

Основное содержание диссертации опубликовано в 13 научных работах, в числе которых 7 статей в периодических журналах перечня ВАК. Получен патент на изобретение и полезную модель.

Личный вклад автора состоит в постановке задач, выполнении основного объема исследований, интерпретации научных положений и выводов. Материалы диссертации являются результатом исследований, выполненных при непосредственном участии автора в лабораторных исследованиях, проводимых в Дальневосточном государственном университете путей сообщения, Тихоокеанском государственном университете, Институте химии ДВО РАН, Институте водных и экологических проблем ДВО РАН.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Содержит 118 страниц основного текста, включая 29 таблиц, 42 рисунка и список литературы из 127 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научных исследований, сформулирована цель и определены задачи работы. Показана научная новизна, практическая значимость и апробация полученных результатов.

В первой главе проведен аналитический обзор современного состояния способов формирования легированных покрытий, дана оценка возможности улучшения свойств, а также проведен обзор существующих методов технологических воздействий при электротермических процессах (сварке и наплавке).

Из проведенного анализа следует, что на сегодняшний день актуальным направлением исследований остается создание наплавочных материалов непосредственно из минерального сырья, без его глубокой технологической переработки. Работы ведущих материаловедов в области комплексного использования сырья (Г.В. Самсонова, Лякишева, Г.П. Швейкина, Ю.В. Цветкова, В.А. Резниченко др.) позволили получить ряд существенных результатов. В тоже время, возрастающие требования к механическим и эксплуатационным свойствам формируемых покрытий

требуют использования большого объема дорогостоящих компонентов при производстве сварочно-наплавочных материалов, поэтому применение недорогого сырья в виде концентратов и отходов горнорудного производства является перспективным. Однако при создании наплавочных материалов непосредственно из минерального сырья сформировался ряд проблем, связанных с нестабильностью характеристик компонентов применяемых материалов, что приводит к снижению служебных характеристик сформированных покрытий.

Анализ литературы показал, что перспективным направлением исследований для решения сложившихся проблем является разработка метода управления формированием покрытий за счет дополнительных технологических воздействий, позволяющих перераспределить тепловые потоки в жидкой ванне и влиять на ее активность, приводя к изменению структуры и свойств легированного слоя. Вопросами технологических воздействия при дуговых процессах, в целях улучшения качества покрытия, занимались ученые ИЭС Патона, МГТУ им. Баумана и др. Однако, в указанных работах не рассматривается вопрос использования концентрированного источника энергии косвенного действия, обеспечивающего комбинацию теплового и магнитного воздействия на жидкую ванну в целях изменения состава, структуры и свойств покрытия.

По результатам обзора выдвинута рабочая гипотеза, основная идея которой заключается в оценке возможности использования вспомогательной дуги косвенного действия (ВДКД) в качестве источника теплового и электромагнитного воздействия при формировании покрытий порошковой проволокой.

Во второй главе представлена методика экспериментальных исследований, дано описание оборудования, а также материалов, используемых при проведении исследования.

Разработана блок-схема (рис.1.), в которой отражена последовательность работы и теоретические предпосылки применения вспомогательной дуги косвенного действия, в качестве источника дополнительного воздействия на жидкую ванну при формировании легированного слоя. В блок-схеме представлены основные разделы исследования от выдвижения гипотезы и разработки новой технологии дополнительного воздействия до ее применения к наплавочным порошковым проволокам, созданным с применением минерального сырья Дальневосточного региона.

При проведении исследования использовалась методика планирования экспериментов, основанная на экспериментально-статистических методах, целью которых является установление зависимостей влияния параметров дополнительного воздействия на состав формируемых покрытий, а так же определение оптимальных интервалов варьирования режимов ВДКД с позиции достижения наибольшей эффективности легирования формируемого покрытия.

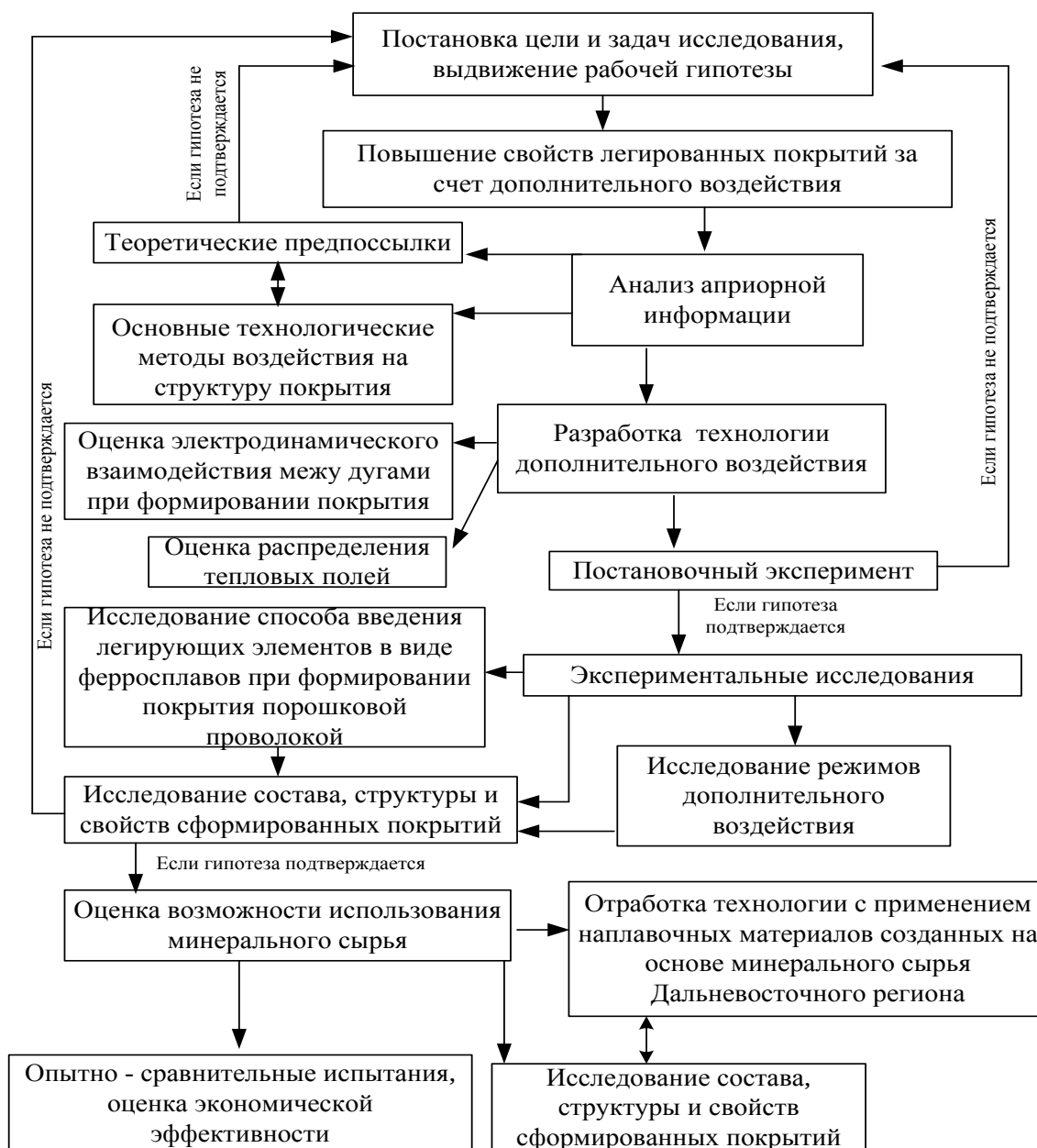


Рис. 1. Блок-схема проведения исследований по оценке влияния дополнительного технологического воздействия на сформированное покрытие

При планировании эксперимента, и опираясь на результаты предварительных опытов, определялись входные (X_1, X_2, X_i) и выходные параметры (Y_1, Y_2, Y_i), являющиеся объектами оптимизации. По результатам рассчитанных значений откликов получали математические зависимости, на основании которых строили диаграммы влияния режимов дополнительного воздействия на состав формируемых покрытий.

Для проведения экспериментальной части работы была разработана и изготовлена установка (рис. 2.), позволяющая формировать покрытия порошковой проволокой с применением вспомогательной дуги косвенного действия.

В третьей главе представлены результаты теоретического расчета тепловых полей и силы электродинамического взаимодействия дуг, а также установлены функциональные зависимости «параметры дополнительного воздействия – состав сформированного покрытия». Исследован состав, структура и свойства покрытий, сформированных сертифицированной порошковой проволокой фирмы Castolin Eutectic (TERO MATEC 4415) в рациональном диапазоне режимов дополнительного воздействия.

Теоретический расчет тепловых полей позволяет определить кривые распределения температур при воздействии основной и вспомогательной дуги косвенного действия на формируемую поверхность. Для решения этой задачи используются упрощенные аналитические подходы, лежащие в основе классической теории распространения теплоты при дуговых процессах, которые позволяют оперативно получить численные оценки параметров электротермического процесса с приемлемой для практических целей точностью. Результат расчета представлен в виде схемы распределения температурного градиента на рис. 2.

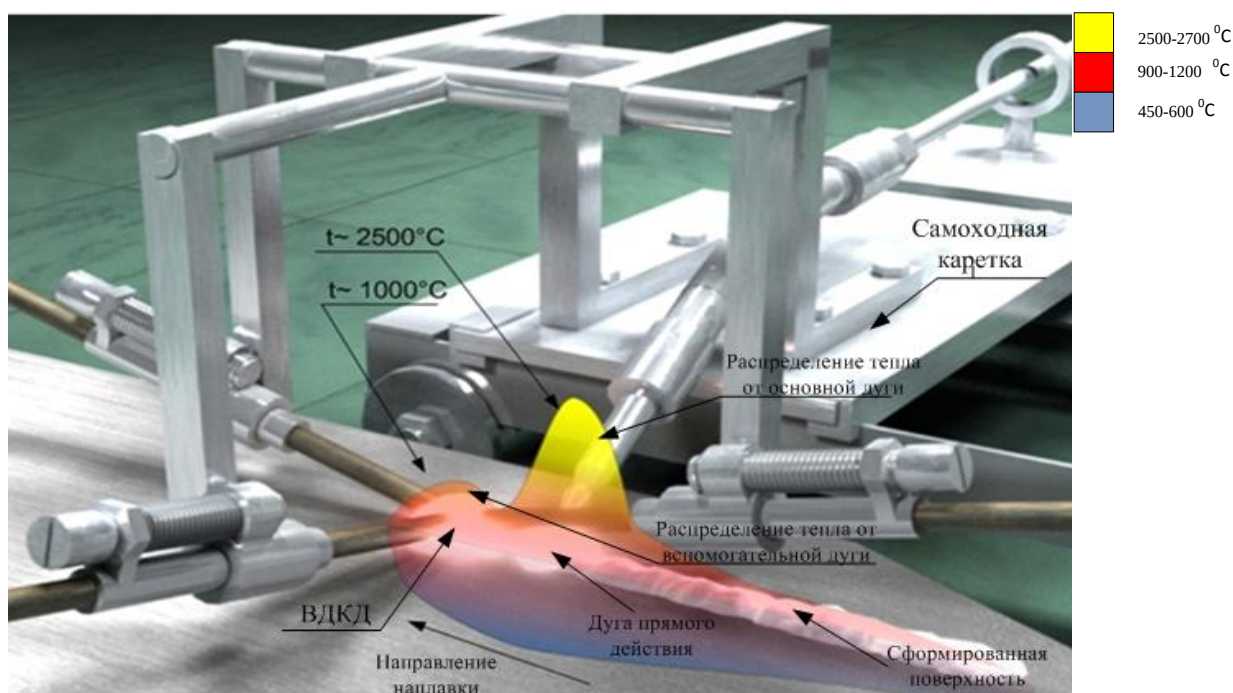


Рис. 2. Внешний вид установки и схема распределения тепла при ее применении

Расчет распределения тепловых полей свидетельствует о том, что температура подогрева формируемой поверхности от воздействия косвенной дуги достигает 1000°C , а температура поверхности от основного сварочного процесса составляет 3000°C .

Влияния поперечного магнитного поля соседних дуг, характеризующее электродинамическое взаимодействие между ними, рассматривается с точки зрения теоретического расчета силы взаимодействия параллельных

проводников с током. Расчет силы электродинамического взаимодействия между дугой прямого и косвенного действия свидетельствует о возможности изменения пространственного положения основной дуги, что приводит к механическому перемешиванию жидкого металла, так при расстоянии между центрами дуг 4-6 мм сила электродинамического взаимодействия составляет $0,10-0,15 \cdot 10^{-2}$ Н.

На следующем этапе, в соответствии с методикой экспериментальных исследований, проводились эксперименты с целью определения характера взаимосвязи между входными и выходными параметрами электродугового процесса при формировании покрытия порошковой проволокой под воздействием ВДКД. В качестве входных параметров были приняты – скорость формирования покрытия (м/мин.), напряжение на вспомогательной дуге (В) и расстояние от ВДКД до основной дуги (мм). В качестве выходных параметров модели – состав сформированного покрытия (переход вольфрама, хрома, марганца). На основе полученных данных построена совмещенная диаграмма, определяющая рациональные параметры дополнительного воздействия (рис. 3).

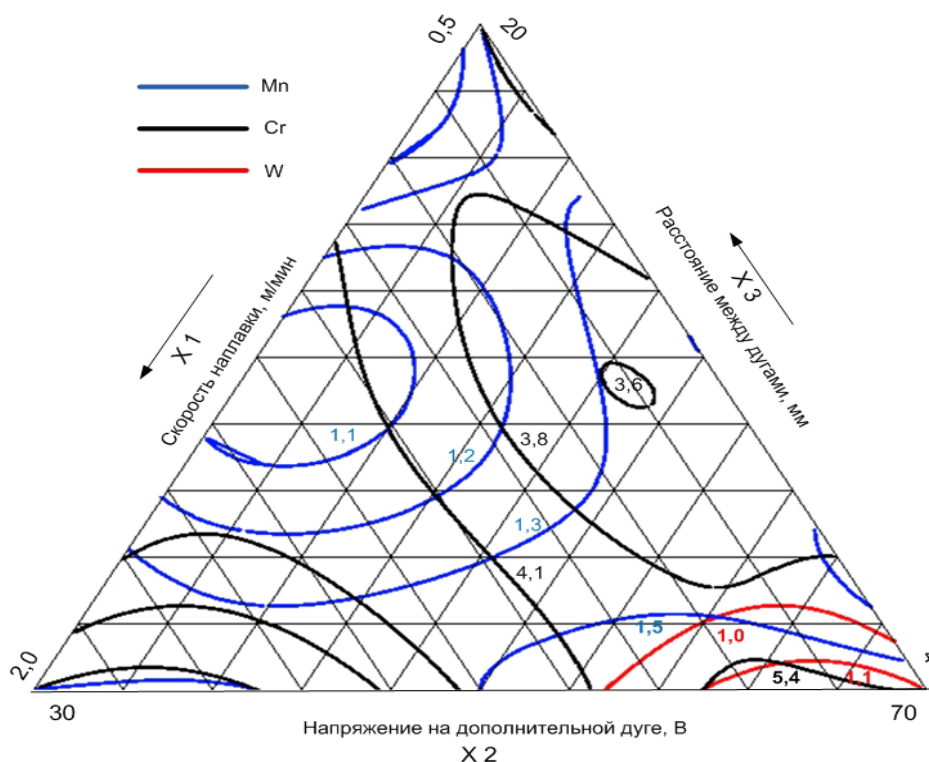


Рис. 3. Совмещённая диаграмма влияния параметров дополнительного воздействия на состав покрытия

Анализ диаграммы свидетельствует о том, что рациональные режимы дополнительного воздействия (наибольшая эффективность легирования и содержание карбидной составляющей) находится при следующих значениях исследуемых факторов: расстояние между дугами 4-6 мм; скорость формирования покрытия до 0,6 м/мин; напряжение на ВДКД 50-70 В. Также

следует отметить, что при увеличении расстояния между дугами до 14 мм и более изменение состава покрытия при воздействии ВДКД не наблюдается.

На следующем этапе исследованы состав, структура и свойства покрытий сформированных с применением ВДКД (в рациональном диапазоне режимов) и без нее, химический состав представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сформированного покрытия

Химический элемент, масс. %	P	Si	Mn	Mo	S	Cr	W	Ti	Zr	C
Без дополнительного воздействия	0,0217	0,8707	1,3443	1,0251	0,0166	3,6029	0,9140	0,1560	-	0,39
С применением дополнительного воздействия ВДКД	0,0199	0,8360	1,7045	1,2526	0,0134	5,3853	1,0818	0,2225	0,0064	0,48

Сравнительный анализ данных таблицы свидетельствует об увеличении перехода легирующих элементов в металл, сформированный с применением вспомогательной дуги (марганца на 0,4%, хрома – 1,7%, молибдена – 0,23%). Распределение легирующих элементов в структурных составляющих покрытий исследовано в отраженных электронах. Обнаруженные фазы, структурные составляющие и их состав представлены на рис. 4 (а, б) и табл. 2, 3.

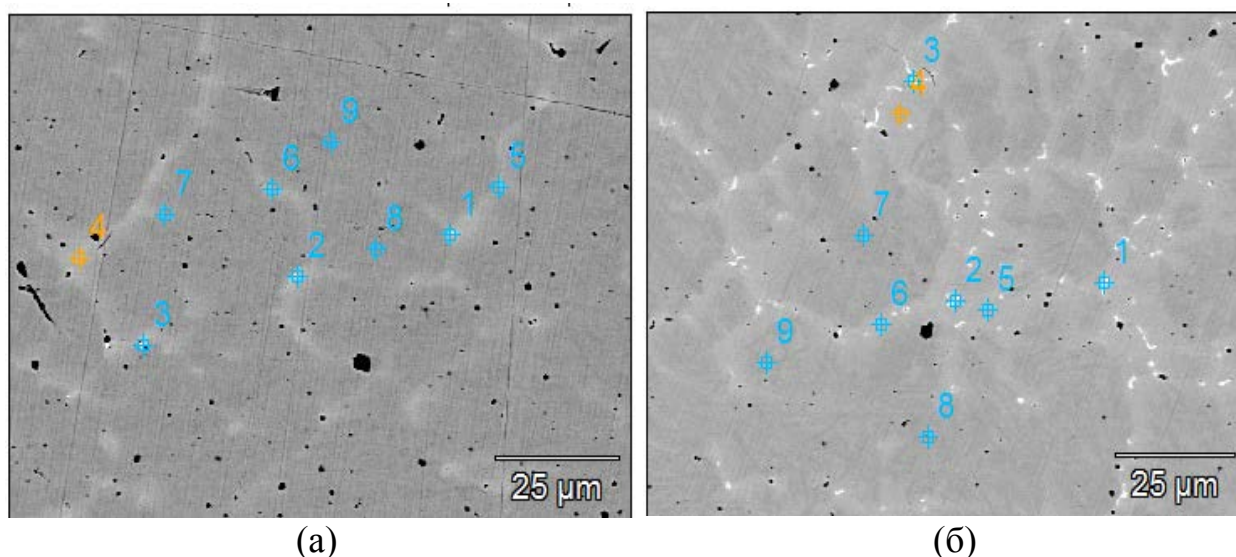


Рис. 4. Структура сформированного покрытия с областями исследования состава: (а) – без воздействия вспомогательной дуги; (б) – с применением дополнительного воздействия ВДКД

Таблица 2

Распределение элементов по площади покрытия, сформированного без
дополнительного воздействия вспомогательной дуги

Фаза, структура	точка	Элемент атом. %							
		C*	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Mo	W
Карбидная фаза	1	10.72	-	-	12.41	1.81	59.40	12.27	2.86
	2	9.07	-	0.46	11.45	2.04	64.61	9.65	2.33
	Среднее значение	9,9	-	0,23	11,93	1,93	62,0	10,96	2,6
Легированный феррит + карбиды	4	3.45	1.73	-	6.20	2.26	83.68	2.02	0.66
	5	3.61	1.56	-	5.54	2.04	85.62	1.23	0.40
	6	3.87	1.53	-	5.74	2.13	84.78	1.44	0.50
	Среднее значение	3,64	1,61	-	5,83	2,14	84,69	1,56	0,52
Механическая смесь	7	3.10	2.41	-	4.80	2.15	86.79	0.75	-
	8	4.25	1.87	-	3.66	1.48	88.34	0.41	-
	9	4.10	1.99	-	3.68	1.26	88.54	0.43	-
	Среднее значение	3,82	2,09	-	4,05	1,63	87,89	0,53	-
	3	19.95	-	7.42	7.15	1.48	56.02	6.13	1.85
*- Элемент микрорентгеноспектральным анализом определен с недостаточной точностью									

Таблица 3

Распределение элементов по площади покрытия, сформированного
с применением дополнительного воздействия ВДКД

Фаза, структура	точка	Элемент атом. %								
		C*	Si	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Mo	W
Карбидная фаза	1	22.19	-	-	0.38	13.46	2.23	46.67	12.68	2.40
	2	24.58	-	0.20	0.47	13.51	1.95	44.79	11.53	2.98
	Среднее значение	23,39	-	0,1	0,43	13,49	2,09	45,73	12,1	2,69
Легированный феррит + карбиды	4	3.55	2.00	-	-	5.89	2.82	84.12	1.09	0.54
	6	3.72	2.03	-	-	6.55	2.86	82.49	1.69	0.66
	Среднее значение	3,64	2,02	-	-	6,22	2,84	83,3	1,39	0,6
Механическая смесь	7	2.54	1.72	-	-	3.99	2.03	88.81	0.46	0.45
	8	2.38	1.71	-	-	3.92	1.90	89.33	0.47	0.30
	9	3.00	1.50	-	-	3.96	1.90	88.99	0.41	0.23
	Среднее значение	2,64	1,64	-	-	3,96	1,94	89,04	0,45	0,33
	3	13.09	-	16.09	0.62	6.22	1.70	51.02	7.57	3.69
	5	12.00	2.08	0.19	-	5.66	2.43	75.94	1.27	0.44
*- Элемент микрорентгеноспектральным анализом определен с недостаточной точностью										

В покрытии, сформированном с применением вспомогательной дуги, в карбидной фазе дополнительно распределяется ванадий (0,43 ат. %) и общее

содержание легирующих элементов возрастает в среднем на 3,4 ат.%. При этом в легированном феррите общее содержание легирующих элементов (Si, Cr, Mn, Mo, W) возрастает на 1,41 ат. %, а содержание углерода остается без изменения (3,64 ат. %). В механической смеси общее содержание легирующих элементов (Si, Cr, Mn, Mo, W) остается без изменения (8,30...8,32 ат. %), а концентрация углерода уменьшается на 1,18 ат. %.

Анализ рис. 4 (а, б) также свидетельствует о росте площади, занимаемой насыщенной легирующими элементами структурной составляющей. Для численной оценки соотношения структурных составляющих, с использованием программы SPECTR MET, был произведен расчет по сегментации яркости структурных составляющих, результат представлен на рис. 5 и табл. 4.

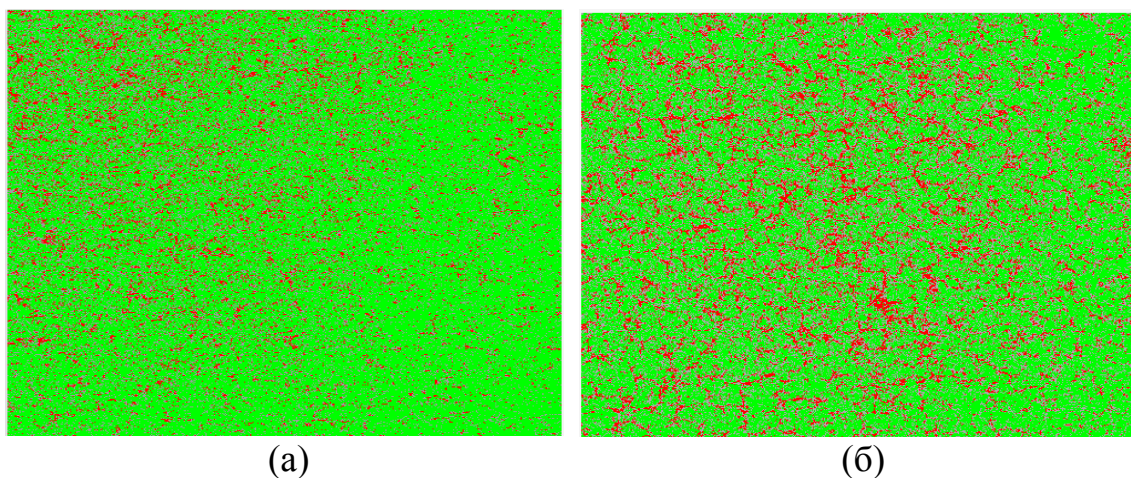


Рис. 5. Соотношение структурных составляющих сформированных покрытий: (а) – без дополнительного воздействия; (б) – с применением дополнительного воздействия ВДКД

Таблица 4

Соотношение структурных составляющих

Структурная составляющая	Площадь, занимаемая структурной составляющей, %	
	без дополнительного воздействия	с применением ВДКД
	91,06	87,22
	8,94	12,78

Анализ данных табл.4 свидетельствует об увеличении концентрации насыщенной легирующими элементами области, ее наибольшая концентрация достигает 12% площади сечения покрытия, а без дополнительного воздействия она составляет 8 %.

Микроструктура покрытия, сформированного без дополнительного воздействия, преимущественно соответствует игольчатому мартенситу (рис. 6 а). Кроме того, в структуре присутствует сложная карбидная фаза, что подтверждается наличием значительного количества (>10 %) легирующих

компонентов в сформированном покрытии. Микроструктура покрытия сформированного под воздействием ВДКД представлена на рис. 6 (б). Ее характер отличается от структуры, полученной традиционным способом (без ВДКД). Отличием служит отсутствие ярко выраженной игольчатой мартенситной структуры, следует отметить, что металл покрытия, полученный с применением ВДКД, состоит из трооститных областей, частично окруженных легированным ферритом, сложная карбидная составляющая сосредоточена, обособлено в областях феррита.

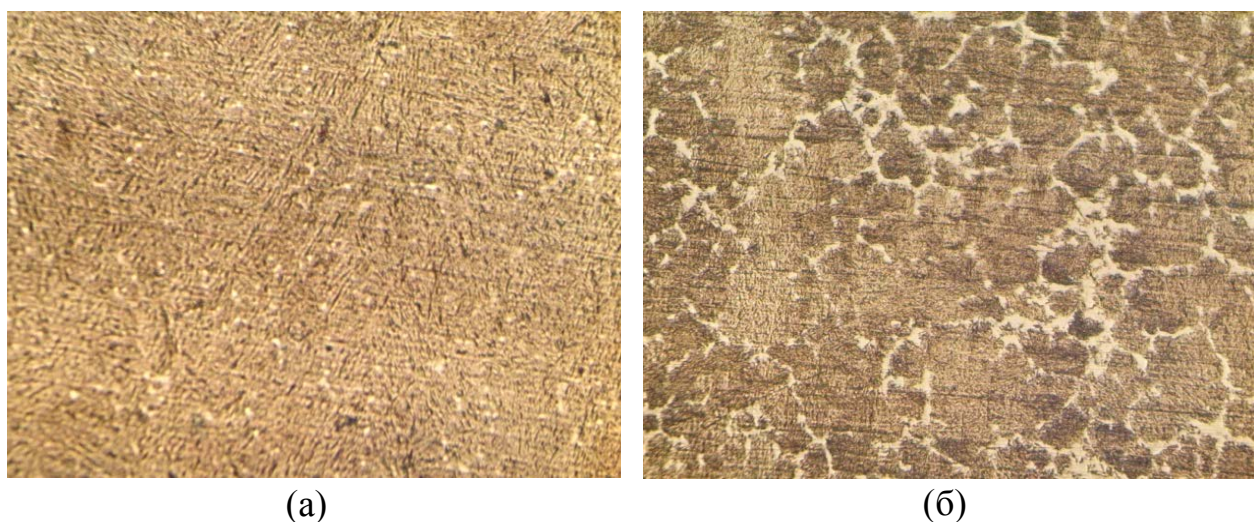


Рис. 6. Микроструктура сформированного покрытия (x400):
(а) – без дополнительного воздействия; (б) – с применением ВДКД

Микротвердость покрытия полученного без дополнительного воздействия составляет 514-573 HV (рис. 7 а). Микротвердость покрытия, сформированного под воздействием ВДКД, составляет 430-742 HV (рис.7 б).

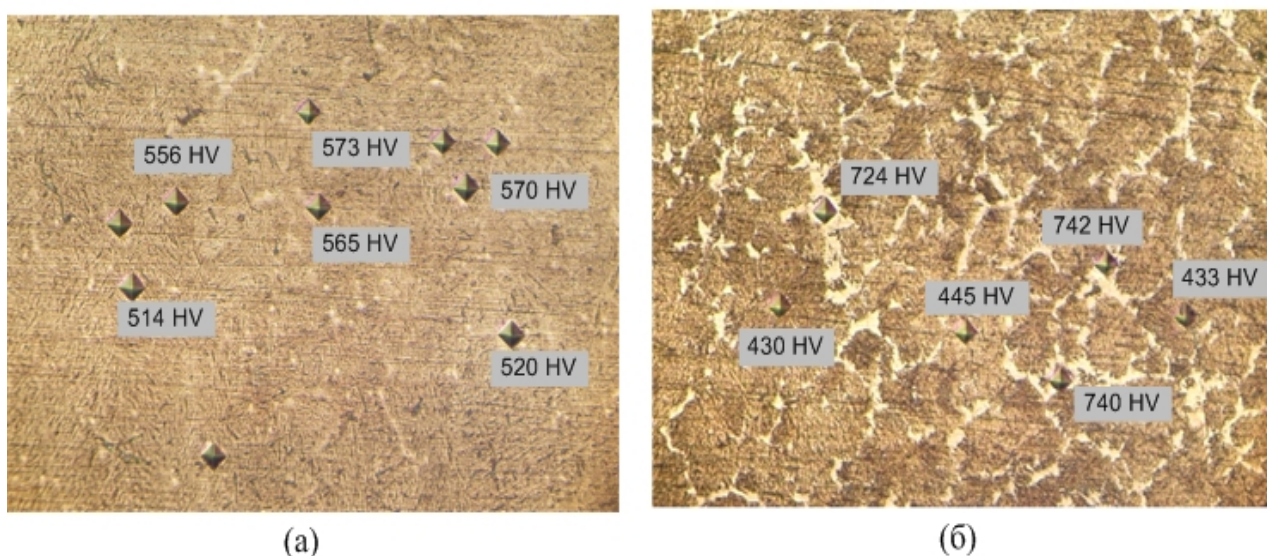


Рис.7. Микротвердость структурных составляющих покрытия (x400):
(а) – без дополнительного воздействия; (б) – под воздействием ВДКД

Распределение твердости по сечению сформированного покрытия представлено на рис. 8(а, б). Анализ данных свидетельствует о том, что применение вспомогательной дуги косвенного действия приводит к более равномерному распределению твердости по сечению слоя, а также к ее значительному приросту, в среднем он составляет до 20 HRC.

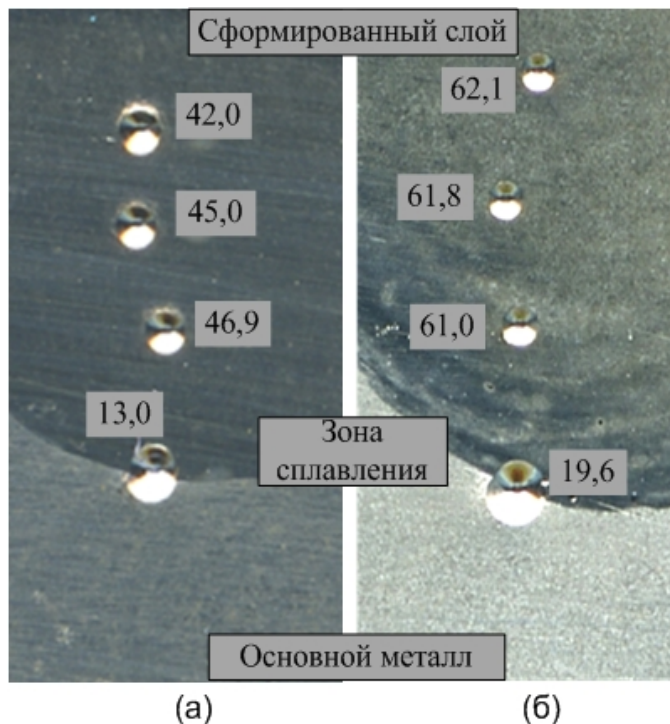


Рис.8. Распределение твердости (HRC) сформированного слоя: (а) – без дополнительного воздействия; (б) – под воздействием вспомогательной дуги

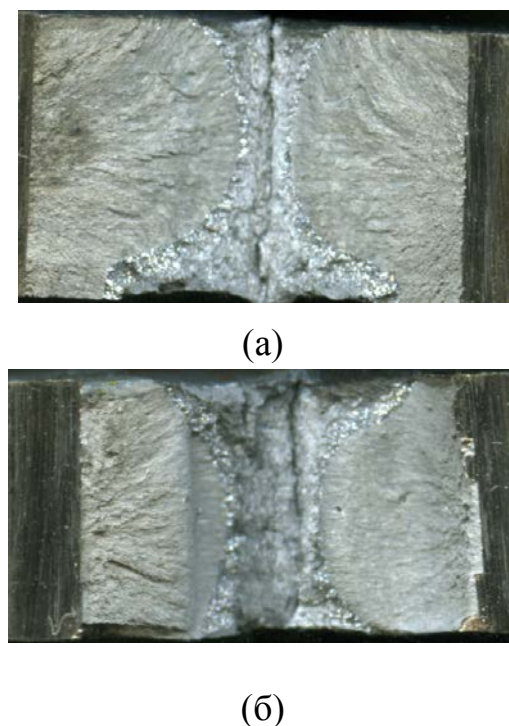


Рис. 9. Характер излома сформированного слоя: (а) – с применением ВДКД; (б) – без дополнительного воздействия

Полученные данные позволяют прогнозировать твердость покрытия от 40 до 60 HRC в зависимости от режимов ВДКД, при этом не приводя к охрупчиванию металла (ударная вязкость составляет 34-38 Дж/см²). Характер излома сформированного слоя представлен на рис. 9 (а, б), излом во всех образцах мелкозернистый с преобладающей вязкой составляющей.

В четвертой главе выполнен анализ минерального сырья Дальневосточного региона и выявлены проблемы, связанные с многокомпонентностью состава исходных составляющих. Это приводит к неоднородности структуры и распределения легирующих элементов в сформированном покрытии. Исследована возможность применения технологии воздействия вспомогательной дугой косвенного действия при формировании покрытий порошковой проволокой на основе минерального сырья Дальневосточного региона.

Многокомпонентность минерального сырья представлена на примере шеелитового концентрата (рис.10), содержащего SiO_2 , CaO , WO_3 , Fe_2O_3 , MgO и другие оксиды.

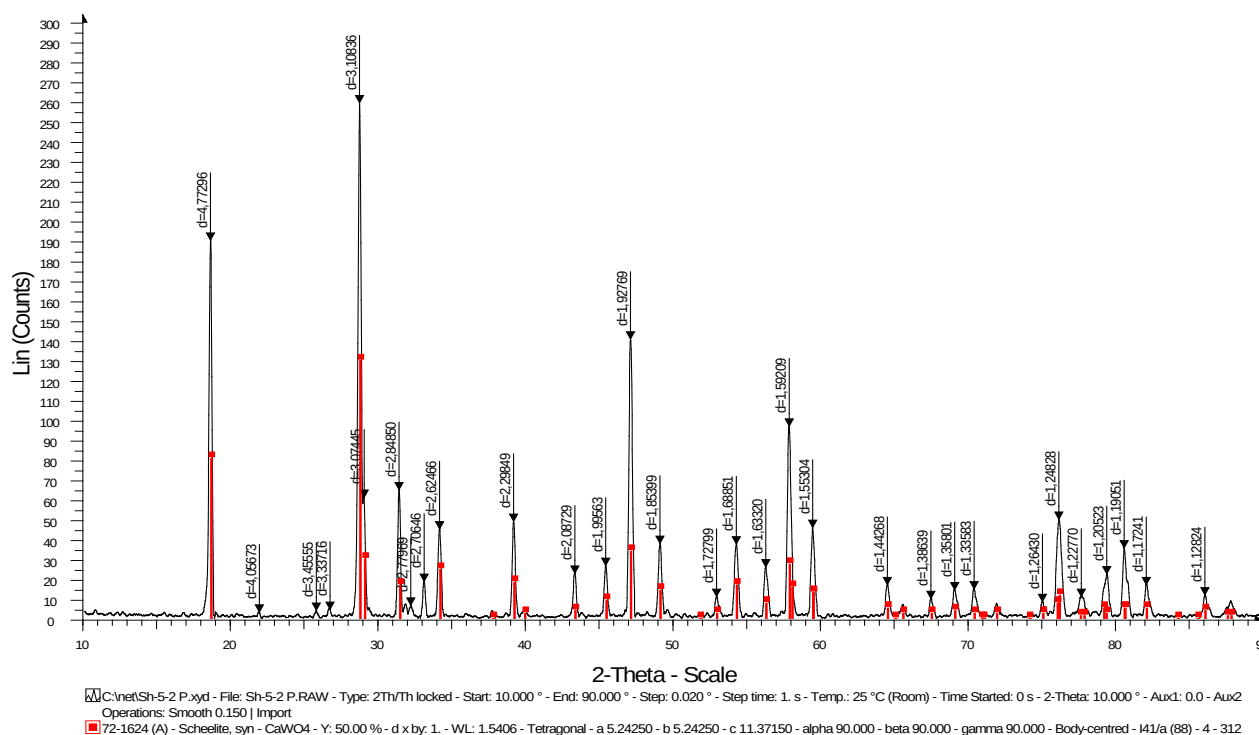


Рис. 10. Фазовый состав шеелитового концентрата

На основе ранее разработанных методик, была получена наплавочная порошковая проволока, для экспериментальной оценки влияния ВДКД на сформированный слой. В качестве основных элементов шихты использован циркониевый, шеелитовый концентрат, а также графит. Состав шихты порошковой проволоки представлен в табл. 5.

Таблица 5

Состав шихты порошковой проволоки

Марка порошковой проволоки	шеелитовый концентрат (CaO , WO_3) масс. %	графит, масс. %	циркониевый концентрат (ZrO_2 , SiO_2) масс. %
ПП-Нп -110В-Т-С-2,8	38,5-40	33,8- 34,5	23,5-25,5
Металл оболочки - сталь 08кп			

Порошковой проволоке присвоена маркировка в ПП-Нп-110В-Т-С-2,8 и получен патент на изобретение (№ 2637849). Микроструктура зоны сплавления и покрытия сформированного разработанной проволокой без дополнительного воздействия представлена на рис. 11. Сформированный слой представлен троосто-мартенситной структурой, состоящей из зерен

троостита и игольчатых включений мартенсита с присутствием цементита по границам зерен, микротвердость слоя составляет от 378 HV до 573HV.

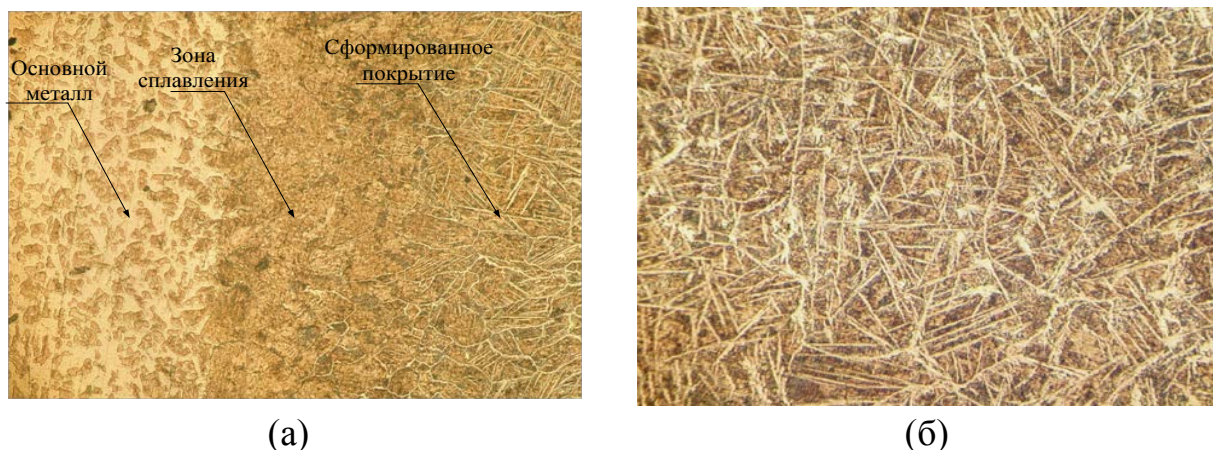


Рис. 11. Микроструктура слоя, сформированного без дополнительного воздействия: (а) – зона сплавления (x200); (б) – металл покрытия (x400)

Микроструктура зоны сплавления и сформированного слоя, полученные с применением ВДКД, представлены на рис. 12.

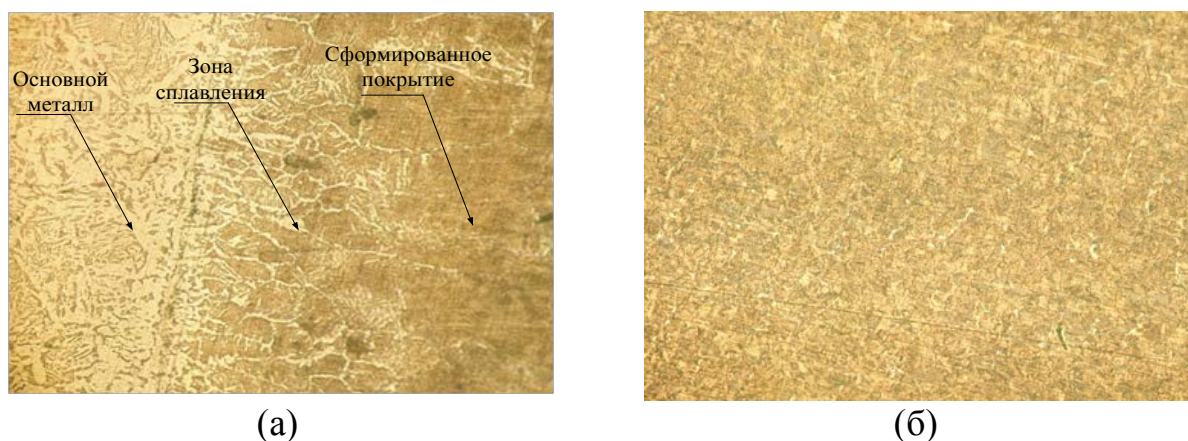


Рис. 12. Микроструктура слоя, сформированного под воздействием ВДКД: (а) – зона сплавления (x200); (б) – металл покрытия (x400)

Характер структуры покрытия, сформированного порошковой проволокой, под воздействием вспомогательной трехфазной дуги косвенного действия отличается от структуры, полученной при наплавке традиционным способом. Структура в зоне сплавления (рис. 12 а) имеет более плавный переход от основного металла в наплавленный, по сравнению с микроструктурой, сформированной без дополнительного воздействия, отсутствует резкая граница. Сформированный слой представляет собой трооститную структуру с цементитом по границам зерен, микротвердость сформированного слоя, составляет от 390 HV до 407HV.

Распределение легирующих элементов в покрытии, сформированном с применением ВДКД, представлено на рис. 13 и табл.6.

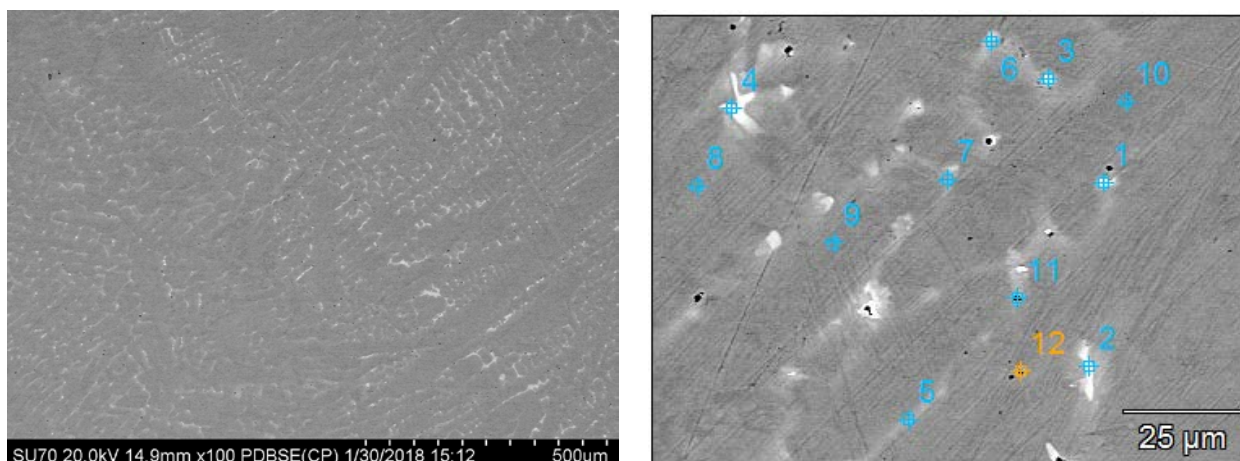


Рис.13. Структура сформированного покрытия: (а) – общий вид;
(б) – расположение точек исследования состава

Таблица 6

Распределение элементов по площади покрытия сформированного
с применением дополнительного воздействия ВДКД

точка	Элемент, атом. %					
	C*	Si	Mn	Fe	Zr	W
1-2	17.66-18.26	-	-	77.34-78.04	-	4.3-4.4
3	27.80	-	-	67.06	-	5.14
4	18.32	-	-	77.89	-	3.79
5	3.60	-	-	95.59	-	0.81
6	9.56	-	-	89.07	-	1.37
7	17.72	-	-	81.34	-	0.95
8-9	4.25-4.97	1.19	-	94.55	-	-
10	15.24	0.78	-	83.98	-	-
11	8.67	-	7.27	83.64	-	0.42
12	1.13	2.11	9.32	67.78	4.81	0.50

*- Элемент микрорентгеноспектральным анализом определен с недостаточной точностью

Анализ микрорентгеноспектральных исследований покрытия в отраженных электронах, свидетельствует о наличии вольфрама, циркония и кремния и марганца в сформированном металле. В точках 1-4 (рис. 13 и табл.6.) наблюдается увеличение содержание вольфрама, что свидетельствует о возможности образования карбидов и легированного цементита. Химический состав сформированного покрытия, представлен в табл. 7.

Таблица 7

Химический состав сформированного покрытия

ПП-Нп -110В-Т-С-2,8	Элемент, масс. %						
	C	Si	Zr	W	Mn	S	P
без дополнительного воздействия	1,0-1,2	0,01	-	0, 60	0,25	0,01	0,03
с применением ВДКД	1.1-1.2	0,17	0,012	1,25	0,26	0,02	0,03

Данные таблицы свидетельствуют об увеличении перехода легирующих элементов при использовании дополнительного воздействия, что доказывает эффективность применения разработанной технологии воздействия ВДКД при формировании покрытий порошковыми проволоками на основе оксидосодержащего минерального сырья.

В пятой главе приведены результаты опытно-сравнительных испытаний деталей, восстановленных порошковой проволокой с применением разработанной технологии ВДКД. Дан расчет экономической эффективности применения данной технологии.

При проведении опытно-сравнительных испытаний восстановленных изношенных поверхностей деталей строительно-дорожных машин, разработанной порошковой проволокой ПП-Нп-110В-Т-С-2,8 с использованием ВДКД установлено, что их износостойкость до 30% превосходит детали, наплавленные без применения дополнительных воздействий.

Расчет себестоимости применения ВДКД (с использованием порошковой проволоки марки ПП-Нп-110В-Т-С-2,8) показал, что годовой экономический эффект, по сравнению с наплавкой этой же проволокой традиционным способом, составит 533840 руб. при массе наплавленного металла (при массе наплавленного металла 573 кг).

Общие выводы и результаты работы:

1. Научно обоснована возможность использования дополнительного технологического воздействия при формировании легированных покрытий, предложена блок-схема проведения исследований, позволяющая оценить влияние дополнительного технологического воздействия вспомогательной дугой косвенного действия на слой, формируемый порошковой проволокой, содержащей легирующие элементы в виде ферросплавов и минерального сырья.

2. Выбрана методика проведения экспериментальных исследований, основанная на использовании экспериментально-статистических методов с симплекс-решётчатым планированием экспериментов, целью которых является установление математических зависимостей и закономерностей влияния параметров дополнительного воздействия на состав сформированного металла, а также определение оптимальных интервалов варьирования режимов с позиции достижения требуемых свойств получаемых покрытий. Разработано экспериментальное оборудование, позволяющее автоматизировать процесс формирования покрытия с возможностью применения дополнительного технологического воздействия.

3. Выполнен расчет распределения тепловых полей, позволяющий упрощенно оценить и прогнозировать влияние дополнительного воздействия на формирование покрытия. Установлено, что дополнительное технологическое воздействие способствует перераспределению температурного градиента (температура подогрева формируемой

поверхности от воздействия ВДКД достигает 1000°C , от основной дуги составляет 3000°C). Расчет силы электродинамического взаимодействия между дугами прямого и косвенного действия свидетельствует о возможности изменения пространственного положения основной дуги, что приводит к механическому перемешиванию жидкого металла.

4. Установлен характер взаимосвязи между входными и выходными параметрами от дополнительного воздействия косвенной дуги, получены математические зависимости, построены графики и совмещённая диаграмма влияния режимов формирования покрытия с применением ВДКД на состав формируемого покрытия. Полученные зависимости изменения состава и соотношения структурных составляющих сформированного покрытия, позволяют прогнозировать свойства в рациональном диапазоне режимов дополнительного технологического воздействия. Так, наибольшее значение твердости (62 HRC) и ударной вязкости (38 Дж/см^2) достигается при напряжении на вспомогательной дуге 50-70 В, расстоянии между основной и вспомогательной дугой 4-6 мм, скорости формирования покрытия до 0,6 м/мин;

5. Доказано, что дополнительное технологическое воздействие способствует перераспределению температурного градиента и перемешиванию расплава (за счет электродинамического взаимодействия дуг), приводя к увеличению перехода легирующих элементов в металл покрытия. Так, при использовании ферросплавов, содержание марганца возрастает на 0,4%, хрома – 1,7%, молибдена – 0,23%. Предлагаемая технология позволяет увеличить содержание сложной карбидной составляющей, что способствует равномерному распределению и повышению твердости покрытия (от 40 до 60 HRC без снижения ударной вязкости, значения которой находятся в пределах $34\text{-}38 \text{ Дж/см}^2$).

6. Проведен анализ минерального сырья Дальневосточного региона, подтверждающий его многокомпонентность и химическую неоднородность, производство наплавочных материалов с использованием неоднородных концентратов приводит к неравномерности распределения легирующих элементов в сформированном покрытии, невысокой эффективности легирования и как следствие снижению эксплуатационных свойств. На основе существующих методик была создана новая наплавочная порошковая проволока из минерального сырья Дальневосточного региона, применение которой совместно с разработанной технологией дополнительного воздействия позволило увеличить износостойкость формируемых покрытий до 30%, за счет формирования более однородной микроструктуры покрытия и увеличения перехода легирующих элементов.

7. На основании проведенных опытно-сравнительных испытаний, подтвержденных актом, произведен расчет экономической целесообразности использования разработанной технологии, при этом экономический эффект составит 533840 руб./год (при массе наплавленного металла 573 кг).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в рецензируемых научных журналах:

1. Макиенко В.М., Перваков Д.Г., Романов И.О., Лихачев Е.А. Повышение физико-механических свойств покрытий, формируемых при электротермических процессах за счет дополнительных технологических воздействий [Текст] // Сварка и диагностика. 2017. № 3. С. 46-50.
2. Романов И.О., Баранов Е.М., Перваков Д.Г., Соколов П.В., Лукьянчук А.В. Формирование износостойких поверхностей рабочих органов путевых машин [Текст] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2017. № 3. С. 21-25.
3. Романов И.О., Перваков Д.Г. Формирование основных направлений развития сварочно-наплавочных материалов на основе метода математически-статистического подхода [Текст] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 12 (156). С. 542-546.
4. Макиенко В.М., Соколов П.В., Романов И.О., Перваков Д.Г., Панкин В.Н. Разработка наплавочных порошковых проволок на основе концентратов и отходов горно-рудного производства дальневосточного региона [Текст] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 12 (144). С. 30-35.
5. Макиенко В.М., Романов И.О., Баранов Е.М., Перваков Д.Г., Соколов П.В. Исследование влияния трехфазной косвенной дуги на формирование легированного покрытия [Текст] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 5 (137). С. 21-24.
6. Макиенко В. М., Соколов П.В., Перваков Д. Г., Романов И. О. Разработка наплавочной порошковой проволоки ильменито-карбонатно-флюоритного типа [Текст] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2016. № 2 (26). С.47-55.
7. Макиенко В.М., Соколов П.В., Перваков Д.Г. Исследование возможности использования отходов горнорудного производства Дальневосточного региона России для создания сварочных материалов используемых в строительстве и ремонте объектов железнодорожного транспорта [Текст] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2015. Т. 1. № 3 (23). С.100-110.

Патентные документы:

1. Порошковая проволока для наплавки (полезная модель) Патент RU 172 042 U1 Российской Федерации, МПК В23К 35/368 (2006.01) Заявитель и патентообладатель ДВГУПС. – 2016121533; заявл. 31.05.2016; опубл. 27.06.2017 Бюл. № 18. Автор(ы): Соколов П.В., Макиенко В.М., Баранов Е.М., Перваков Д.Г.

2. Порошковая проволока для наплавки. Патент на изобретение № 2637849 Российской Федерации, МПК В23К 103/02 (2006.01) Заявитель и патентообладатель ДВГУПС. – 2015149197; заявл. 16.11.2015; опубл. 19.05.2017 Бюл. № 14. Автор(ы): Баранов Е.М., Романов И.О., Перваков Д.Г., Соколов П.В.

Статьи и материалы конференций:

1. Романов И.О., Перваков Д.Г. Современные методологии оптимизации ремонтных воздействий на изношенные детали – достоинства и недостатки / Вестник Института тяги и подвижного состава // под ред. А.Е. Стецюка. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017. – Вып. 13. – С. 57-59.
2. Макиенко В.М., Соколов П.В., Перваков Д.Г. Разработка наплавочной порошковой проволоки ильменито-карбонатно-флюоритного типа для создания износостойкой наплавки [Текст] // Материалы международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» 14-15 апреля 2016 г. в Санкт-Петербурге. С.49-56.
3. Макиенко В.М., Соколов П.В., Перваков Д.Г. Разработка наплавочной порошковой проволоки для восстановления деталей подвижного состава на основе минерального сырья дальневосточного региона [Текст] // Материалы Седьмой международной научно-практической конференции г. Иркутск 29 марта – 01 апреля 2016. Том 2. С. 421-432.
4. Макиенко В.М., Соколов П.В., Перваков Д.Г. Восстановление деталей и узлов подвижного состава методом электродуговой наплавки [Текст] // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2016. № 1 (6). С. 6-11.
5. Макиенко В.М., Соколов П.В., Перваков Д.Г. Исследование возможности использования отходов горнорудного производства Дальневосточного региона России для создания сварочных материалов [Текст] // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Комсомольск-на-Амуре, 12-16 мая 2015 г. / редкол. : О.Ю. Еренков (отв.ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. – 320 с.
6. Макиенко В.М., Соколов П.В., Перваков Д.Г. Применение метода термодинамических расчетов для определения хода химических преобразований при электродуговом процессе сварки [Текст] // Вестник института тяги и подвижного состава. 2015. № 11. С. 31-37.

Перваков Дмитрий Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ
ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 06.11.2018 Формат 60x84/16

Уч.-изд. л.1.5. Усл. печ. л.1.4

Заказ 197. Тираж 100 экз.

Издательство ДВГУПС

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47