

На правах рукописи



**РОМАНОВ**  
**Игорь Олегович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ  
ЦИРКОНИЕВОГО ТИПА ДЛЯ НАПЛАВКИ ДЕТАЛЕЙ  
ИЗ МАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ**

**Специальность 05.03.06 – Технологии и машины  
сварочного производства**

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

**Барнаул - 2008**

Работа выполнена в Государственном общеобразовательном учреждении высшего профессионального образования – "Дальневосточном государственном университете путей сообщения" (ГОУ ВПО ДВГУПС).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Макиенко Виктор Михайлович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Радченко Михаил Васильевич**

кандидат технических наук  
**Пинаев Владимир Георгиевич**

Ведущее предприятие: Институт машиноведения и металлургии  
ДВО РАН (г.Комсомольск-на-Амуре)

Защита диссертации состоится «7 мая» 2008 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46 .

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

Шевцов Ю.О.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Экономическая стабильность России базируется на развитии ее регионов, в том числе и Дальневосточного, при освоении которого требуется решать множество научно-технических и экономических проблем. Выполнение поставленных задач направлено на рост наиболее значимых отраслей промышленности, одной из которых является сварочное производство. Развитие данной области позволит не только снабдить Дальневосточный регион дешевыми и качественными сварочными материалами на основе местной сырьевой базы, но и обеспечит возможность использования прогрессивного оборудования и сварочных процессов.

В настоящее время сформировался мощный арсенал технологий сварки. В результате анализа конъюнктуры рынка установлено, что в странах с развитым машиностроением и судостроением (страны Европейского Союза, Япония и др.) соотношение ручной дуговой сварки к автоматической изменяется в сторону увеличения доли механизированных способов и составляет примерно 1 к 4. Одним из перспективных методов является использование самозащитных порошковых проволок (ПП), позволяющих формировать слои с широким спектром механических и эксплуатационных свойств. При этом исключается подача защитного газа и флюса, что повышает технологичность проведения сварочно-наплавочных работ. Применение данного способа является необходимым условием при развитии тяжелого машиностроения, судостроения и строительства, требующих высокопроизводительных способов сварки (наплавки).

Установлено, что при строительстве автомобильных и железных дорог, развитии горнодобывающей и золотодобывающей отраслей поверхности рабочих органов машин такие, как зубья ковшей экскаваторов, отвалы, дренажные черпаки, крестовины стрелочных переводов и т.д., имеют непродолжительные сроки службы и требуют значительных затрат на восстановление. Для обеспечения требуемого ресурса работы деталей их изготавливают, в основном, из стали 110Г13Л, которая, обладая высокой ударной вязкостью (300-350 Дж/см<sup>2</sup>), способна в процессе эксплуатации (при наклепе) обеспечить твердость рабочей зоны до 530-560 НВ. Кроме того, для продления срока службы таких деталей можно применять различные способы (плазменное напыление, упрочнение взрывом и т.д.). Однако в условиях производства, в настоящее время, изношенные детали либо меняют на новые, либо используют непроизводительный и малоэффективный способ восстановления – ручную дуговую наплавку электродами (ЭА-395/9, ОК 86.08, ОК 86.20 и др.). В связи с этим исследована возможность восстановления указанных деталей высокомарганцевистой стали методом наплавки порошковой проволокой.

Работа выполнялась в соответствии с планами фундаментальных исследований Министерства путей сообщения, в рамках хоздоговорных и хозбюджетных исследований совместно с предприятиями Дальневосточной железной дороги, а также с программами вузов МПС Сибирских и Дальневосточ-

ных регионов и СО РАН по обеспечению и снижению эксплуатационных расходов и энергоресурсов: тема П 2000/1-10.2 «Создание и внедрение сварочно-наплавочных материалов из минерального сырья Дальневосточного региона для восстановления деталей подвижного состава, строительного-дорожных машин и элементов пути».

**Цель работы:**

Разработать и исследовать порошковую проволоку циркониевого типа для наплавки, повышающей эксплуатационные свойства деталей из марганцовистой стали.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Разработать методику создания шихты порошковых проволок на основе результатов экспериментальных исследований;
2. Разработать и исследовать газшлакообразующую систему на основе концентратов, содержащих оксиды легирующих компонентов ( $ZrO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $W_2O_3$ ), восстанавливаемых в процессе плавления;
3. Исследовать закономерности перехода легирующих элементов из шихты в наплавленный металл;
4. Разработать состав сердечника порошковой проволоки, обеспечивающего высокие механические и эксплуатационные свойства металла, наплавленного на марганцовистую сталь.
5. Опытным путем оценить эффективность применения созданной наплавочной порошковой проволоки в условиях эксплуатации.

**Научная новизна работы:**

1. Научно обоснована и обобщена методика создания сердечника порошковых проволок, заключающаяся в анализе требований, предъявляемых к сварочно-наплавочным материалам, комплексном исследовании условий их реализации, а также указанной последовательности проведения экспериментов.
2. Впервые исследована возможность использования графита в качестве газообразующего компонента шихты, что позволило получить новую газшлакообразующую систему порошковых проволок, обеспечивающую снижение потерь легирующих элементов за счет образования монооксида углерода.
3. Впервые установлены условия восстановления циркония из циркониевого концентрата, обеспечивающие переход в наплавленный металл до 0,37 мас.% этого элемента (патент № 60888), что позволило:
  - а) обеспечить снижение износа наплавленного слоя за счет:
    - измельчения зерна аустенита, что достигается образованием дополнительных центров кристаллизации;
    - образования упрочняющей фазы – комплексного нитрида глобулярной формы;
  - б) исключить применение ферросплавов (ферротитана и алюминиевого порошка) и использовать восстановленный цирконий в качестве нитридообразующего и легирующего компонента шихты.
4. Впервые получен сердечник порошковой проволоки циркониевого типа

(на основе циркониевого концентрата), позволяющий получать высоколегированные покрытия за счет восстановительной атмосферы дуги и уменьшения окислительной способности шлака.

5. Получены регрессионные зависимости механических и эксплуатационных характеристик формируемых покрытий, а также закономерности перехода легирующих элементов Mn, Zr и C в наплавленный металл в зависимости от содержания в шихте ферромарганца, циркониевого концентрата и графита.

**Достоверность и обоснованность** научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается применением современных методов исследования состава, структуры и свойств материалов путем использования методик и оборудования, аттестованных государственной и международными службами стандартизации и метрологии, а также производственной практикой.

**Практическая значимость работы:**

1. На основе разработанной газошлакообразующей системы получены наплавочные порошковые проволоки, обеспечивающие твердость наплавленного металла 150 ... 300 НВ и ударную вязкость 290 ... 300 Дж/см<sup>2</sup> (при  $t = 20^{\circ} \text{C}$ ).

2. Получен новый состав шихты порошковой проволоки, повышающий работоспособность деталей, изготовленных из высокомарганцевистой стали (110Г13Л) в 1,2...1,5 раза.

3. Результаты исследования внедрены на ремонтном предприятии Корфовский каменный карьер.

**На защиту выносятся:**

1. Методика создания шихты порошковых проволок.

2. Результаты экспериментальных исследований по использованию циркониевого концентрата в качестве нитридообразующего и легирующего компонента сердечника.

3. Результаты экспериментальных исследований по созданию газошлакообразующей системы порошковых проволок.

4. Результаты экспериментальных исследований по созданию наплавочной порошковой проволоки на сталь 110Г13Л.

5. Результаты эксплуатационных испытаний покрытий, формируемых созданной порошковой проволокой.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы докладывались на: 43-й Всероссийской научно-практической конференции "Современные технологии - железнодорожному транспорту и промышленности" (Хабаровск, 22-23 октября 2003 г.); IV Международной научной конференции творческой молодежи "Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке" (Хабаровск, 12-14 апреля 2005 г.); шестой международной научно-практической конференции "Проблемы транспорта Дальнего Востока" (Владивосток, 5-7 октября 2005 г.); 44-й Всероссийской научно-практической конференции "Современные технологии – железнодорожному транспорту и промышленности" (Хабаровск, 25-26 января 2006 г.); региональной научно-технической конференции творческой молодежи "Научно-

технические проблемы транспорта, промышленности и образования" (Хабаровск, 18-19 апреля 2006 г.); Joint China-Russia symposium on advanced materials processing technology, Harbin, P.R. China, August 21-22, – 2006; V Международной научной конференции творческой молодежи "Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке" (Хабаровск, 17-19 апреля 2007 г.)

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ, из них пять – в рецензируемых журналах. Получены патенты № 55319 (заявка № 2006104131), № 60888 (заявка № 2006133705) .

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, библиографического списка и приложений. Содержит 153 страницы машинописного текста, 72 рисунка, 57 таблиц и библиографический список из 146 наименований.

Автор выражает благодарность заслуженному деятелю науки Российской Федерации, доктору технических наук, профессору А.Д. Верхотурову и кандидату технических наук, доценту Е.М. Баранову за оказанную помощь и поддержку при выполнении диссертационной работы.

Работа выполнялась в Дальневосточном государственном университете путей сообщения на кафедре «Технология металлов» в 2002-2007 гг.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** приведено современное состояние вопроса создания сварочных материалов, рассмотрены способы восстановления изношенных поверхностей, представлены особенности металлургических процессов при наплавке порошковыми проволоками, изложены основные положения создания шихты порошковых проволок с использованием многокомпонентных минеральных ассоциаций Дальневосточного региона.

Анализ литературных источников показал, что на современном этапе создания сварочно-наплавочных материалов существуют научно-технические и методологические проблемы, решению которых уделяется недостаточно внимания. Работы в этом направлении носят единичный и разрозненный характер. Как показывает мировой опыт, наиболее перспективными способами восстановления изношенных поверхностей являются электротермические технологии: сварка (наплавка) в среде защитных газов и порошковыми проволоками. В то же время на Российских предприятиях доля механизированных способов сварки составляет всего 20 % от общего объема работ. Поэтому создание материалов для автоматической и полуавтоматической сварки является весьма актуальным направлением развития самих предприятий. При этом особый интерес представляют составы сердечника, обеспечивающие получение формируемых покрытий с высоким уровнем механических и эксплуатационных характеристик.

Анализ металлургических процессов, протекающих при сварке (наплавке) порошковыми проволоками рутилового и карбонатно-флюоритного типа, позволил установить, что наилучшими технологическими свойствами обладают проволоки с кислым типом сердечника, однако они не позволяют получать высоколегированные слои из-за склонности к порообразованию, а наличие в составе шихты карбонатов существенно увеличивает окислительную способность шлака. Анализ существующих марок порошковых проволок позволил выявить ряд недостатков:

- высокие потери легирующих элементов на угар, что существенным образом повышает себестоимость наплавленного металла;
- наличие технологической операции «удаление шлаковой корки», что не позволяет в полной мере конкурировать с методом сварки (наплавки) проволоками сплошного сечения в среде защитных газов.

Можно отметить, что в настоящее время необходим поиск новых композиций сердечника порошковых проволок, позволяющий устранить вышеуказанные недостатки.

Дальневосточный регион обладает большими запасами многокомпонентных минеральных ассоциаций, которые можно использовать как для обеспечения качественного технологического процесса (мрамор, гранодиорит), так и для легирования (циркониевый, шеелитовый, датолитовый и другие концентраты). Особый интерес представляют ассоциации, в которых кроме CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O содержатся оксиды легирующих элементов (циркония, вольфрама, бора). Одним из таких концентратов является циркониевый концентрат, содержащий в своем составе цирконий. Уникальным свойством циркония является его способность связывать газы (азот, кислород, водород).

**Во второй главе** изложена методика создания шихты, приведено оборудование для производства порошковых проволок, исследования состава структуры и свойств наплавленного металла.

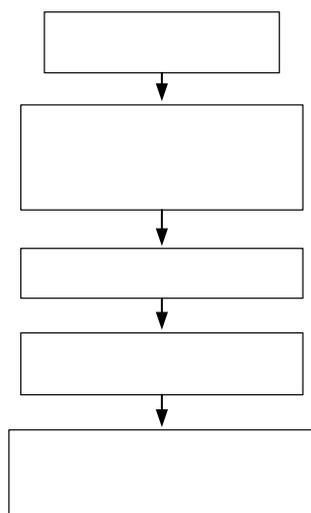


Рис. 1. Алгоритм создания порошковых проволок

Необходимым условием разработки технологии получения порошковой проволоки является выполнение определенной последовательности методов. Алгоритм по созданию порошковых проволок первоначально были обоснованы основные требования, предъявляемые к сварочно-наплавочным материалам:

- защита расплавленного металла от воздействия газов (азота, кислорода, водорода). При этом оценивается пористость наплавленного металла;
- формирование покрытий с заданными механическими и эксплуатационными свойствами. Показателем данного требования является ударная вязкость, твердость, износостойкость и др. параметры;
- обеспечение сварочно-технологических характеристик (потери, отделение шлака и т.д.)

Каждое требование выполняется различными механизмами и способами в процессе формирования легированного покрытия. К примеру, пористость, вызываемую воздействием перечисленных газов, предотвращают следующими способами:

- путем использования газовой и шлаковой защиты расплавленного металла;
- легированием металла шва нитридообразующими и раскисляющими металлами: марганцем, кремнием, алюминием, титаном, цирконием и др.;
- прокалкой шихты, а также использованием плавикового шпата ( $\text{CaF}_2$ ).

Для формирования покрытий с заданными свойствами используют два подхода:

- применение легирующих элементов в виде ферросплавов металлических добавок (ферромарганец, ферросилиций, феррохром, ферротитан, ферробор, алюминиевый, никелевый, медный порошок и др.);
- использование концентратов, содержащих элементы в виде их оксидов ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$  и др.).

Для выполнения третьего требования необходимо учитывать: химическую и физическую природу шлака, назначение коэффициента заполнения, выбор режимов сварки (наплавки). Это достигается назначением кислого или основного типа сердечника с последующим подбором экспериментальным путем режимов наплавки и коэффициента заполнения.

Схематически вышесказанное представлено на рис. 2.

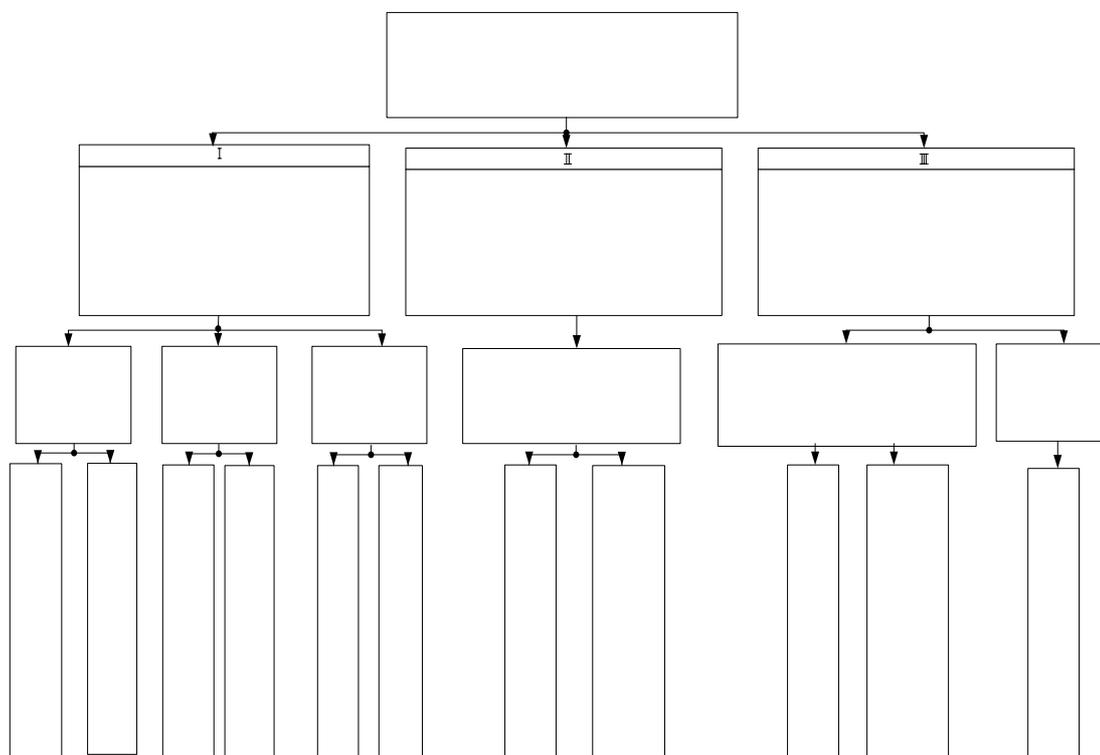


Рис. 2. Взаимосвязь требований к сварочно-наплавочным материалам и механизмов их реализации

Для получения требуемого наплавочного материала необходимо, в первую очередь, определиться с химическим составом наплавляемого металла, далее

выбрать химическую природу шлака и только затем проводить корректировку режимов наплавки с оценкой воздействия активных газов на свойства формируемых покрытий.

Заключительным этапом является оценка работоспособности разработанных порошковых проволок в условиях эксплуатации.

Для изготовления порошковых проволок применялся волочильный стан марки НИИМ-ЛПП 4/350. Однако в процессе изготовления проволок возникла необходимость оперативного изменения требуемого коэффициента заполнения. Для решения данной проблемы был разработан дополнительный механизм (рис.3), позволяющий быстро и точно устанавливать коэффициент заполнения.

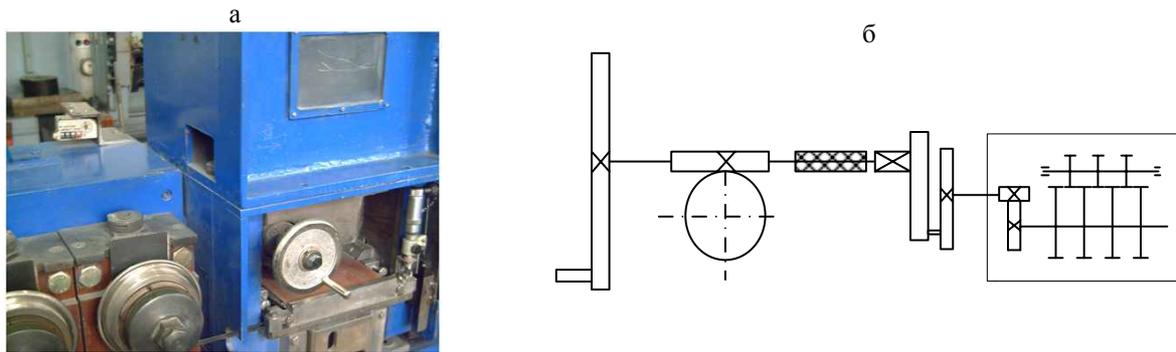


Рис. 3. Механизм настройки коэффициента заполнения  
а – общий вид; б – кинематическая схема

Экспериментальные исследования проводились с применением сварочного полуавтомата, состоящего из источника питания марки ВДУ-505-1 и механизма подачи МПО-44-2. Температура прокали шихты определялась с помощью установки дериватограф Q-1000. Фрактографический анализ изломов сварных швов наплавленного металла производился на бинокулярном микроскопе БМС-9. Микроструктурный анализ полученных сплавов проводился с помощью металлографических микроскопов ММР-2 и ММУ-3. Микротвердость определялась на приборе ПМТ-3М. Химический состав полученных материалов изучался с помощью рентгеноспектрального анализатора «СПЕКТРОСКАН». Микроспектральный анализ распределения легирующих элементов в структурных составляющих проводили на электронно-зондовом микроскопе JEOL JXA800. Анализ механических и эксплуатационных характеристик изучаемых покрытий проводился при помощи следующих приборов: для определения твёрдости (ТШ-2М, МПБ-2, ТК-2 и ТП-2); ударной вязкости образцов (маятниковый копер марки 2010 КМ-30); машины трения (МИ-402) для определения износостойкости периферийного трения скольжения, сопровождаемого ударными воздействиями. Результаты измерений обрабатывались с применением методов математической статистики на основе прикладных программ Microsoft Excel и Maple.

**В третьей главе** представлены результаты исследования по созданию газошлакообразующей системы порошковых проволок циркониевого типа, установлено ее влияние на эффективность перехода легирующих элементов в

наплавленный металл. Доказана возможность получения высоколегированного наплавленного слоя с применением кислого типа сердечника.

Для получения новой газшлакообразующей системы, способной обеспечить максимальный переход легирующих компонентов, а также исключая необходимость удаления шлаковой корки в процессе наплавки, проведен выбор компонентов шихты (табл.1). Исходя из выполняемых функции, были отобраны для проведения экспериментов рутиловый и циркониевый концентраты, являющиеся, как известно, хорошими шлакообразующими компонентами, обеспечивающими защиту расплавленного металла.

В тоже время в дуговом процессе при использовании компонентов, обладающих большим сродством к кислороду, возможно восстановить титан и цирконий из двуокиси. При этом обеспечивается нитридообразование, легирование, раскисление, рафинирование. Наиболее активным восстановителем является углерод, который может быть одновременно использован в качестве газообразующего, легирующего и раскисляющего компонента. Кроме него, в качестве легирующей, раскисляющей и рафинирующей добавки может также использоваться ферромарганец.

Таблица 1

### Выбор компонентов в зависимости от выполняемых ими функций

Компонент	Функции	
	без восстановления элементов из оксидов	после восстановления элементов из оксидов
Рутиловый концентрат	Шлакообразующий	Нитридообразующий, раскисляющий, легирующий
Циркониевый концентрат	Шлакообразующий	Нитридообразующий, раскисляющий, легирующий, рафинирующий
Графит	Газообразующий, легирующий, раскисляющий	
Ферромарганец	Легирующий, раскисляющий, рафинирующий	

На первом этапе исследований устанавливалась зависимость перехода титана из шихты в наплавленный металл от содержания рутилового концентрата и графита (рис.4). Исследования и термодинамические расчеты показывают, что титан восстанавливается в ходе электродугового процесса в присутствии углерода в неравновесных условиях при температурах, существенно ниже 3000 °С.

Однако применение рутилового концентрата в шихте не обеспечивало одного из главных технологических требований – формирование качественного наплавленного слоя. В наплавленном металле наблюдается наличие развитой пористости, что, вероятно, связано с повышением вязкости жидкого шлака и поверхностного натяжения расплава металла, что, в свою очередь, уменьшает скорость всплытия пузырьков газа.

Таким образом, при использовании рутилового концентрата не выполняется обеспечение необходимых характеристик (требование № 1 и № 3 при создании сварочно-наплавочных порошковых проволок (рис.2)).

На следующем этапе проведены исследования возможности использования циркониевого концентрата (в замен импортного рутила) в качестве нитридообразующего и легирующего компонента, которые включали рентгенофазовый (рис.5), химический (табл.2), гранулометрический (рис.6) анализы.

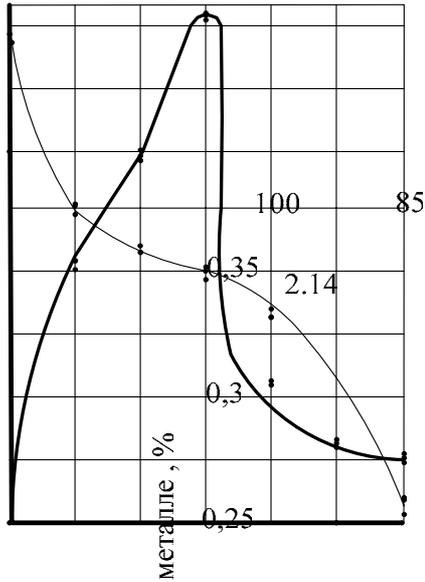


Рис. 4. Содержание титана в наплавленном металле в зависимости от массовых долей рутилового концентрата и графита.

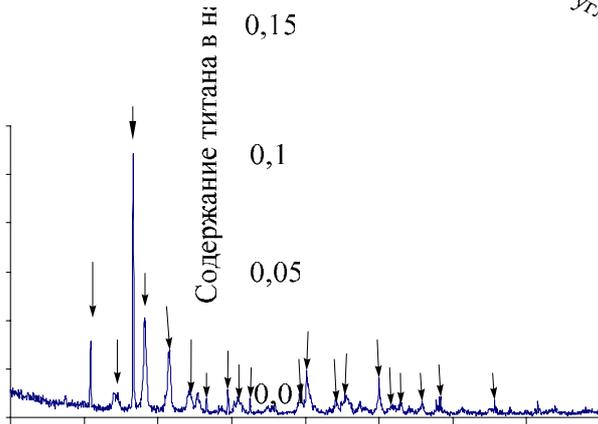


Рис. 5. Рентгенодифракционный спектр циркониевого концентрата

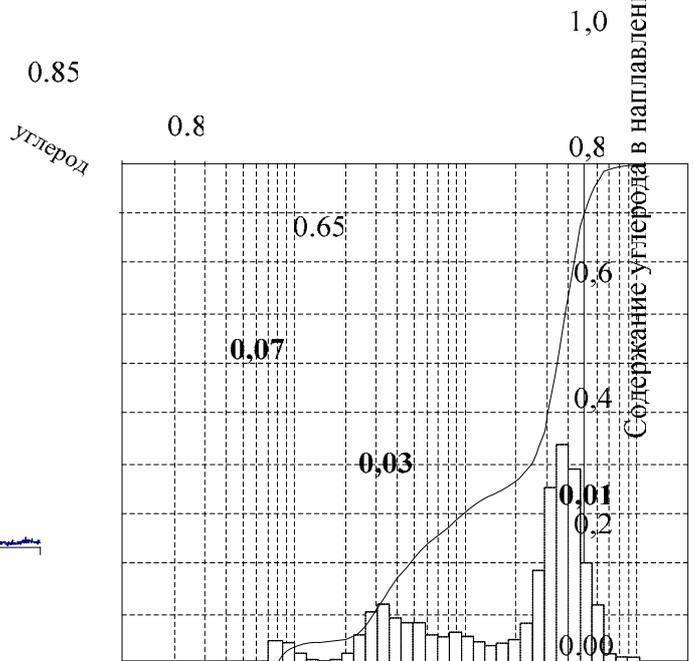


Рис. 6. Гранулометрический состав циркониевого концентрата

Таблица 2

**Химический состав циркониевого концентрата**

Компоненты концентрата	SiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	WO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сульфатные остатки	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Др. компоненты
Мас. доля, %	54	43	2,0	0,16	0,08	0,06	0,7

Проведенный анализ показал, что цирконий в концентрате находится в виде двуокиси с содержанием 43 мас. %. При этом большая часть двуокиси содержится во фракции менее 0,125 мкм.

I, имп/с SiC<sub>2</sub>

Далее устанавливалось содержание циркония в наплавленном металле в зависимости от массовых долей циркониевого концентрата и графита в составе шихты (рис.7).

Результаты исследования показали, что переход циркония носит немонотонный характер, а его максимальное содержание (0,37 мас. %) соответствует точке, отвечающей весовым долям 85 мас. % графита и 15 мас. % циркониевого концентрата. Проведенный рентгенофазовый и микроструктурный анализ показали, что структура слоя состоит из феррита и перлита (рис. 8).

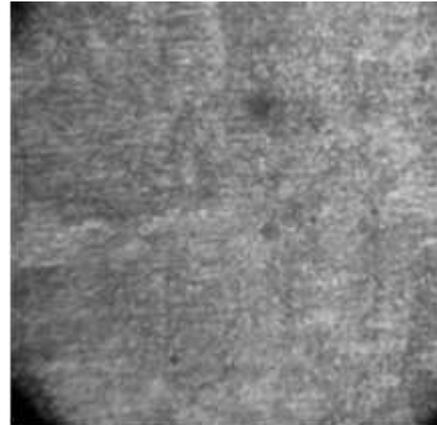
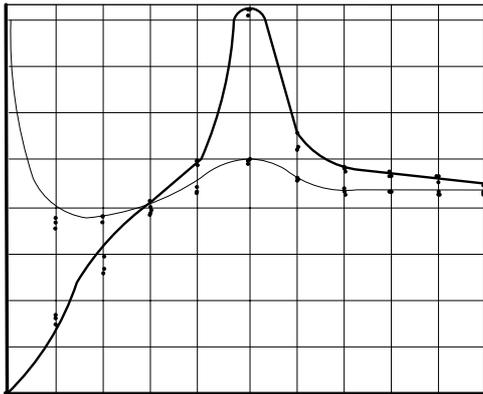


Рис. 7. Результаты исследования перехода циркония в наплавленный металл в зависимости от массовых долей графита и циркониевого концентрата

Рис. 8. Микроструктура металла состоящая из феррита и перлита (x 80)

Сканирование в отраженных электронах (рис.9) данных структурных составляющих указывает на неоднородность сплава.

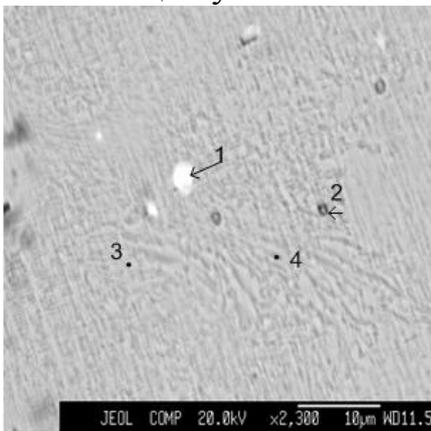


Рис. 9. Микроструктура наплавленного металла в отраженных электронах (x700)

Исследование химического состава с помощью электронно-зондового микроанализатора показало, что матрица сплава содержит включения. В точке 1 содержится циркония 67,31 мас. %, железа 23,74 мас. % и 3,89 мас.% азота, что, вероятно, соответствует дисперсному комплексному нитриду  $Fe_xZr_{1-x}N_z$ . Точки 3, 4 соответствуют ферриту, а точка 2 комплексному сульфату  $Fe_xO_y \cdot Zr_zS_k$ . Распределение в структуре таких элементов, как кремний, вольфрам, медь, марганец – равномерное, ликвационных аномалий не выявлено.

Наличие в структуре мелкодисперсных нитридов доказывает, что восстановленный цирконий осуществляет защиту расплавленного металла от воздействия азота. Таким образом, проведенные исследования доказывают возможность использования циркониевого концентрата в качестве нитридообразующего компонента шихты в кислом типе сердечника.

В процессе наплавки происходит восстановление других легирующих элементов, что способствует получению легированного наплавленного слоя

(табл.3). Предложенный состав шихты не только выполняет функцию газошлакообразующей системы, но и является легирующей добавкой (патент № 60888).

Таблица 3

### Химический состав слоя наплавленного слоя

Номер состава шихты	Количество элементов в наплавленном слое, %							
	C	Zr	Mn	Si	W	Cu	S	P
1	1,0	0,37	0,23	0,3	0,04	0,09	0,0061	0,0093

При этом в процессе наплавки отсутствует шлаковая корка (рис. 10), что вероятно, объясняется присутствием восстановительной атмосферы. Возможность образования монооксида углерода была доказана при помощи газовой хроматографии. Наличие CO показывает, что дуга имеет восстановительный характер и создает дополнительную защиту от воздействия атмосферных газов.



Рис. 10. Сформированное покрытие после наплавки  
а - разработанной порошковой проволокой;  
б - проволокой марки ПП-Нп-90Г13Н4

Далее устанавливались режимы наплавки новой порошковой проволокой путем оценки общей пористости образца (рис. 11, 12).

Анализируя полученные зависимости, можно сказать, что с ростом напряжения на дуге растет величина общей пористости. Это связано с увеличением длины дуги, что облегчает растворение азота в металле. С увеличением силы сварочного тока содержание азота в наплавленном металле и в каплях электродного металла снижается. Это закономерно, так как, во-первых, повышается температура каплей (превышает  $2200^{\circ}\text{C}$ ), что усиливает газоотделение. Во-вторых, уменьшается время зависания капли, следовательно, и продолжительность контакта ее с газовой фазой. В-третьих, уменьшается общая площадь поверхности каплей.

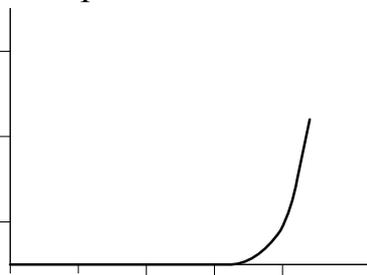


Рис. 11. Зависимость общей пористости от напряжения на дуге

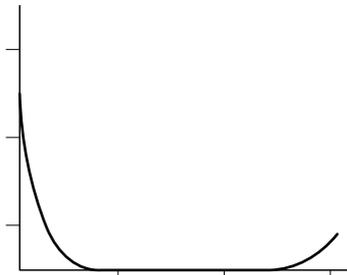


Рис. 12. Зависимость общей пористости от силы тока

Исследования позволили установить рабочие интервалы токов и напряжения, при которых отсутствуют поры в наплавленном металле  $I = 250-300 \text{ A}$ ,  $U = 26-28 \text{ V}$ .

Наличие восстановительной атмосферы определенным образом влияет на переход легирующих элементов. Для оценки эффективности перехода легирующих элементов в наплавленный металл, использовали коэффициент перехода, который рассчитывался по формуле:

$$\text{---} \quad (1)$$

где

$X_{\text{экс.}}$  - содержание элемента в наплавленном металле;

$X_{\text{рас.}}$  - расчётное содержание элемента в порошковой проволоке.

Для изучения закономерностей легирования наплавленного металла, обеспечивающего стабильность свойств и структуры, в ходе экспериментов устанавливалась зависимость легирования марганцем и эффективность его усвоения ( $K_{\text{пер}}$ ) от изменения массовой доли графита (ГС) и ферромарганца (ФМн-05) сердечника. Экспериментальные данные по содержанию легирующих элементов и  $K_{\text{пер}}$  приведены на рис.13.

Из графика видно, что максимальное значение коэффициента перехода марганца достигает в точке, отвечающей весовым долям 50% графита + 50% ферромарганца, при этом коэффициент перехода составляет 0,72 %, что в 1,76 раза превышает переход марганца при использовании его в качестве добавки в порошковую проволоку с основным типом сердечника (рис.14).

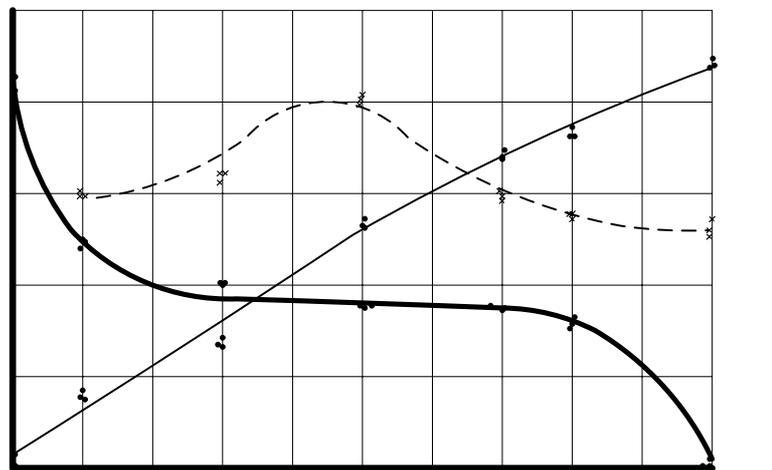


Рис. 13. Комплексное применение ферромарганца и графита.

На следующем этапе исследовался коэффициент перехода марганца при введении ферромарганца в систему «графит – циркониевый концентрат» (рис. 15). В этой системе существенно возрастает эффективность газовой и шлаковой защиты, происходит очистка межзеренных границ, что устраняет интеркристаллитное разрушение.

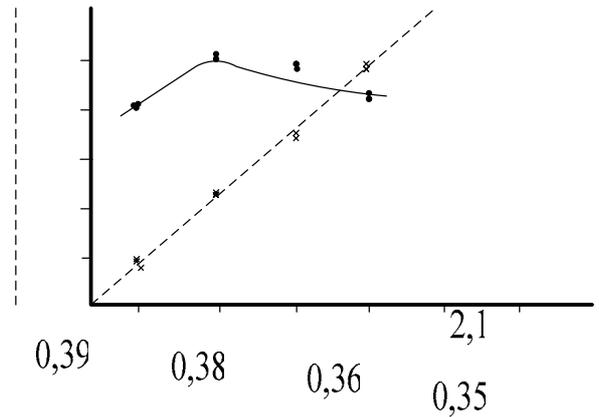
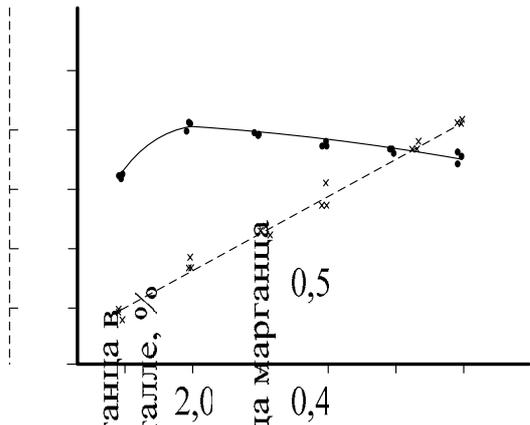


Рис. 14. Зависимость коэффициента перехода марганца от массовой доли ферромарганца (основной тип сердечника)

Рис. 15. Зависимость перехода марганца от содержания в шихте ферромарганца (предлагаемый тип сердечника)

Из рис. 15 видно, что предлагаемый тип сердечника обеспечивает снижение потерь марганца, при этом химический состав металла представлен в табл.3

Таблица 3

**Химический состав металла, наплавленного опытной порошковой проволокой**

Легирующие элементы	Mn	Si	C	S	P
Содержание мас. %	11,4	0,3	0,9	0,015	0,025

Массовая доля ферромарганца в шихте, %

Рентгеноструктурный анализ (рис. 16) показывает наличие аустенитной структуры с микротвердостью  $H_u = 195-240$  HV (рис. 17).

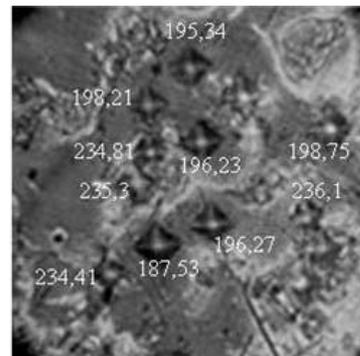
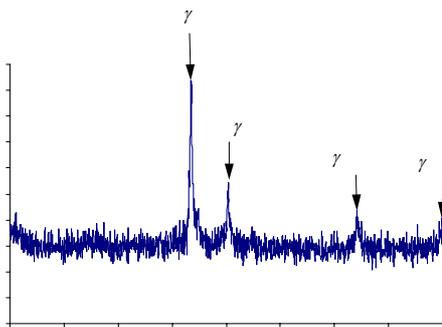


Рис. 16. Рентгendifракционный спектр наплавленного металла

Рис. 17. Микроструктура наплавленного слоя и микротвердость аустенита (x800)

Таким образом, доказано, что порошковые проволоки предложенного типа обеспечивают возможность получения высоколегированного покрытия.

**Четвертая глава** посвящена разработке состава шихты ПП для наплавки стали 110Г13Л. Приведены результаты исследования закономерностей перехода легирующих элементов из шихты в наплавленный металл. Исследовались механические и эксплуатационные свойства получаемых покрытий, а также технологические характеристики порошковых проволок.

Для получения оптимального состава шихты ПП с целью наплавки высокомарганцевистой проводилось планирование эксперимента трехфакторной системы (ферромарганец, графит, бадделеитовый концентрат). При решении задач по установлению регрессионных зависимостей «состав – свойство» формируемых покрытий в качестве входных факторов принимались содержание в шихте: ферромарганца (X1), циркониевого концентрата (X2), графита (X3), а в качестве выходных – содержание в металле марганца (Y1), циркония (Y2), углерода (Y3). Оценивалась интенсивность перехода легирующих элементов: коэффициент перехода марганца (Y4), коэффициент перехода углерода (Y5), коэффициент усвоения циркония (Y6). Выходными параметрами механических и эксплуатационных свойств служат: значения твердости (Y7) и коэффициента износостойкости (Y8). Для получения функций откликов, связывающих состав шихты со свойствами наплавленного металла, был использован симплекс – решетчатый план четвертой степени. Реализация плана дает регрессионные зависимости:

– **содержания углерода в наплавленном металле**

$$y = 0,8 \cdot x_1 + 0,2 \cdot x_2 + x_3 + 1,6 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,2 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,24 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,96 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot (x_1 - x_2) + 0,8 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot (x_1 - x_3) + 0,8x_2x_3(x_2 - x_3) + 0,21x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 0,8x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 2,1x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - 0,4x_1^2x_2x_3 + 18,35x_1x_2^2x_3 - 0,48x_1x_2x_3^2 ;$$

– **коэффициента перехода углерода**

$$y = 0,8x_1 + 0,08x_2 + 0,12x_3 + 1,84x_1x_2 - 1,12x_1x_3 - 0,04x_2x_3 + 0,16x_1x_2(x_1 - x_2) - 0,32x_1x_3(x_1 - x_3) + 0,1x_2x_3(x_2 - x_3) - 5,54x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 0,64x_1x_3(x_1 - x_3)^2 - 0,05x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - 14,1x_1^2x_2x_3 + 1,97x_1x_2^2x_3 + 2,88x_1x_2x_3^2 ;$$

– **содержания марганца в наплавленном металле**

$$y = 19 \cdot x_1 + 0,099 \cdot x_2 + 0,2 \cdot x_3 + 20 \cdot x_1 \cdot x_2 + 16,32 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,74 \cdot x_2 \cdot x_3 + 14,55 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot (x_1 - x_2) + 13,68 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot (x_1 - x_3) + 0,335x_2x_3(x_2 - x_3) + 115,63x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 31,57x_1x_3(x_1 - x_3)^2 - 0,78x_2x_3(x_2 - x_3)^2 + 277,57x_1^2x_2x_3 - 35,09x_1x_2^2x_3 - 7,33x_1x_2x_3^2 ;$$

– **коэффициента перехода марганца**

$$y_1 = 0,547x_1 + 0,5x_2 + 0,92x_3 + 0,506x_1x_2 - 0,454x_1x_3 + 0,76x_2x_3 - 0,232x_1x_2(x_1 - x_2) + 0,195x_1x_3(x_1 - x_3) + 1,12x_2x_3(x_2 - x_3) + 0,67x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 0,99x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 1,01x_2x_3(x_2 - x_3)^2 - 0,47x_1^2x_2x_3 + 3,98x_1x_2^2x_3 + 3,13x_1x_2x_3^2 ;$$

– **содержания циркония в наплавленном металле**

$$y = 0,55x_1 + 0,033x_2 + 0,19x_3 + 0,18x_1x_2 + 0,25x_1x_3 + 0,25x_2x_3 - 0,09x_1x_2(x_1 - x_2) + 0,144x_1x_3(x_1 - x_3) - 0,696x_2x_3(x_2 - x_3) + 0,1x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 1,65x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 1,61x_2x_3(x_2 - x_3)^2 + 1,15x_1^2x_2x_3 + 2,45x_1x_2^2x_3 - 5,82x_1x_2x_3^2 ;$$

– **коэффициента усвоения циркония**

$$y = 0,05x_1 + 0,006x_2 + 0,11x_3 + 0,048x_1x_2 + 0,12x_1x_3 + 0,008x_2x_3 - 0,25x_1x_2(x_1 - x_2) - 0,1x_1x_3(x_1 - x_3) - 0,36x_2x_3(x_2 - x_3) - 0,416x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 0,37x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + 0,65x_2x_3(x_2 - x_3)^2 + 3,07x_1^2x_2x_3 + 0,496x_1x_2^2x_3 - 5,46x_1x_2x_3^2 ;$$

– **твердости**

$$y = 270x_1 + 121x_2 + 363x_3 + 134x_1x_2 - 438x_1x_3 - 140x_2x_3 + 229x_1x_2(x_1 - x_2) + 207x_1x_3(x_1 - x_3) + 207x_2x_3(x_2 - x_3) - 898,67x_1x_2(x_1 - x_2)^2 - 317,33x_1x_3(x_1 - x_3)^2 - 37,33x_2x_3(x_2 - x_3)^2 + 8661,33x_1^2x_2x_3 + 4082,67x_1x_2^2x_3 - 7949,33x_1x_2x_3^2 ;$$

– **коэффициента износостойкости**

$$y_5 = 3,42x_1 + 1,84x_2 + 1,36x_3 - 8,36x_1x_2 + x_1x_3 + 7,6x_2x_3 - 1,76x_1x_2(x_1 - x_2) - 17,6x_1x_3(x_1 - x_3) + 8,59x_2x_3(x_2 - x_3) - 4,1x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + 42,19x_1x_3(x_1 - x_3)^2 - 29,87x_2x_3(x_2 - x_3)^2 + 160,75x_1^2x_2x_3 - 94,67x_1x_2^2x_3 - 5,39x_1x_2x_3^2 .$$

Полученные зависимости были использованы для построения контурных кривых поверхностей откликов (рис. 15-18), позволяющих решать практические задачи по созданию шихты порошковых проволок, изменяя состав которых, можно в широких пределах регулировать состав наплавленного металла и получать с помощью этого покрытия с заданными свойствами.

Рассматривая рис. 15-18, можно сказать, что содержание марганца и циркония монотонно возрастает с увеличением содержания в шихте графита. Вероятно, это вызвано образованием восстановительной атмосферы дуги (образованием монооксида углерода). Немонотонное изменение твердости и износостойкости, вероятно, объясняется частичным растворением карбидов марганца в шлаке, что коррелирует с немонотонным переходом углерода в наплавленный слой.

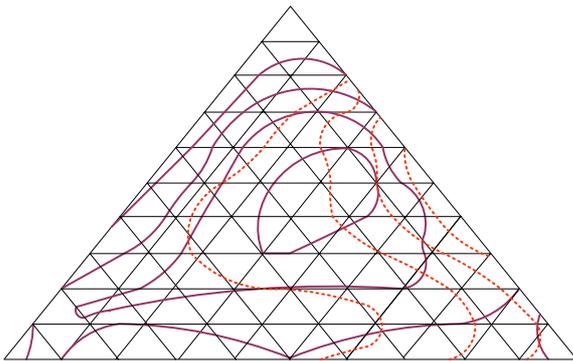


Рис. 15 Совмещенная диаграмма содержания в слое и коэффициента перехода углерода  
 — содержание углерода в наплавленном металле, мас. %; - - - - коэффициент перехода углерода

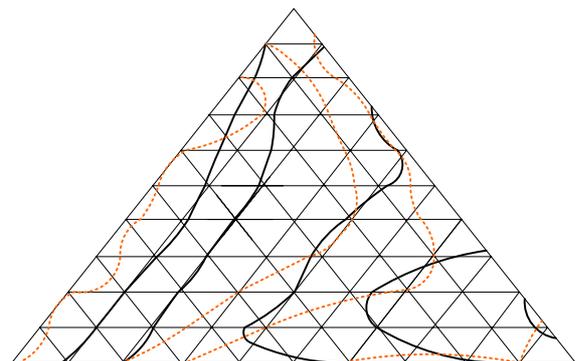


Рис. 16 Совмещенная диаграмма содержания и коэффициента перехода Mn  
 — содержание марганца в наплавленном металле, мас. %; - - - - коэффициент перехода Mn

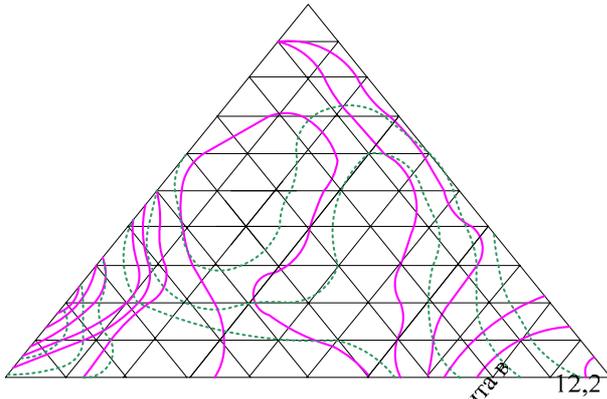


Рис. 17 Совмещенная диаграмма содержания и коэффициент усвоения циркония в наплавленном металле, мас. %; --- коэффициент усвоения циркония.

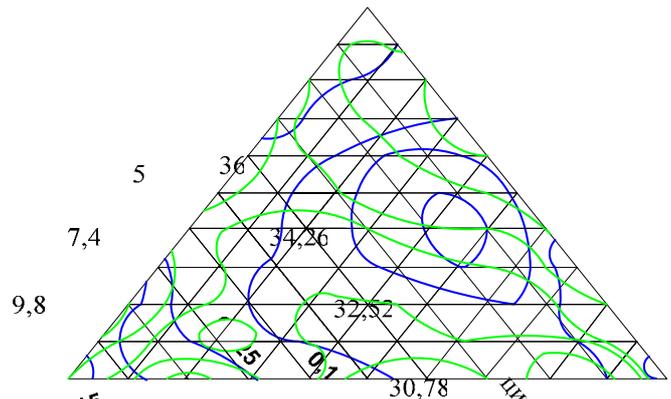


Рис. 18 Совмещенная диаграмма механических и эксплуатационных характеристик наплавленного слоя, HV; --- износостойкость наплавленного слоя относительно стандартных электродов марки ЭА-395/9.

Назначение состава шихты порошковой проволоки для наплавки стали 110Г13Л проводилось на основании априорной информации, при этом содержание марганца в наплавленном слое должно быть 11,5-14,5 %, углерода 0,85-1,3 %. Сформированное покрытие должно обеспечивать твердость 220-250 НВ.

Исследование состава, структуры и свойств покрытий проводилось с использованием порошковых проволок, разработанных по данным рис.15-18. Состав шихты этих материалов приведен в табл. 3

Химический состав и механические свойства полученного металла представлены в табл.4. Из данных видно, что твердость и износостойкость формируемых покрытий соответствуют прогнозируемым.

Таблица 3

**Составы шихты порошковой проволоки**

Компоненты №	FeMn, мас. % / (г)	Графит, мас. % / (г)	Циркониевый кон-т, мас. % / (г)	Никелевый порошок, мас.% / (г)
1	54 / (59)	20 / (21,8)	19 / (20,3)	7 / (8)
2	60 / (74)	17 / (20,6)	17 / (20,3)	6 / (8)
3	65 / (88,5)	14 / (19)	15 / (20,3)	6 / (8)

Таблица 4

**Результаты экспериментов**

компоненты №	Mn, масс. %	Углерод, мас. %	Цирконий, мас. %	Твердость, НВ	Коэффициент износостойкости
1	10,3	0,9	0,15	246	1,4
2	11,7	0,85	0,17	223	1,5
3	12,5	0,85	0,15	207	1,35

Анализируя данные табл. 4, можно сказать, что все составы шихты обес- печивают химический состав стали 110Г13Л, однако состав № 2 обладает лучшей износостойкостью. Проведенный рентгенофазовый анализ (рис. 19) и анализ микротвердости фаз (рис. 20) данного металла показал, что структу- ра наплавленного слоя состоит из аустенита с микротвердостью  $H_{\mu} = 190 - 235$  HV.

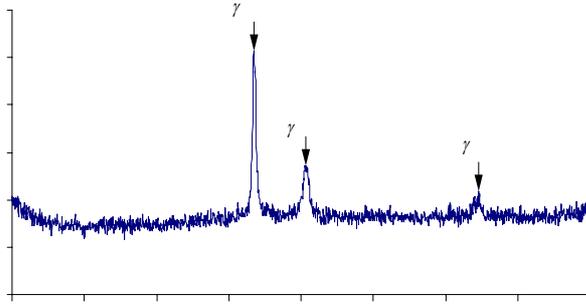


Рис. 19 Дифрактограмма наплавленного ме- талла

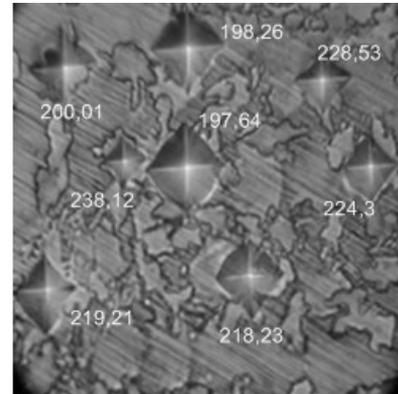


Рис. 20 Микротвердость аустенита (x 800) - Fe

При наплавке данной проволокой отсутствует шлаковая корка, что по- вышает технологичность проведения наплавочных работ, поскольку отпадает необходимость удаления шлака. Основные характеристики разработанной порошковой проволоки представлены в табл. 5.

Основные характеристики

Таблица 5

Сварочный мате- риал	Производи- тельность, кг/ч	Сила то- ка, А	Напря- жение, В	Вылет, мм	Положение шва	Потери ме- талла при наплавке ( $K_{п}$ ), %
ПП-Нп-90Г13Н4ЛС (опытная порошко- вая проволока)	8,1	250...300	26-30	20...23	нижнее	6-8
ПП-Нп-90Г13Н4 (прототип)	6-7	220-240	20-22	15-20	нижнее	17-20
электроды ЭА-395/9	0,8-2,4	140-160	22-26	-	во всех, кроме вер- тикального	10-12

Исследования хладостойкости сформированного покрытия показали, что до температуры  $-80^{\circ}C$  наплавленный металл не имеет явно выраженного по- рога хладноломкости, что, вероятно связано с присутствием никеля и цирко- ния, которые повышают хладостойкость. Анализ структуры в отраженных электронах показал, что интеркристаллитные включения отсутствуют. Нали- чие внутренних дефектов (пор, трещин) оценивалось при помощи рентгенов- ского аппарата АРИНА – 3. В ходе исследований установлено, что вышепри- веденные дефекты отсутствуют.

Таким образом, экспериментальные исследования доказали возможность получения наплавленного слоя, соответствующего стали 110Г13Л. При этом износостойкость в 1,5 раза выше износостойкости слоя, наплавленного электродами марки ЭА-395/9, за счет измельчения зерна аустенита и образования упрочняющей фазы – комплексного нитрида глобулярной формы;. Данной порошковой проволоке присвоена марка ПП-Нп-90Г13Н4ЦС-Т-С-2,8 в соответствии с ГОСТ 26101-84.

**В пятой главе** представлена оценка эффективности применения разработанной порошковой проволоки для восстановления деталей строительно-дорожных машин.

В ходе работы были выявлены наиболее изнашиваемые детали строительно-



Рис. 21 Вспомогательное оборудование для наплавки зубьев ковшей экскаваторов

но-дорожных машин (в основном это зубья ковшей экскаваторов), изготавливаемые из стали 110Г13Л. На основе разработанной порошковой проволоки отработана технология механизированного восстановления изношенных поверхностей. Для наплавки зубьев было разработано вспомогательное оборудование (рис. 21), позволяющие формировать слои в различных пространственных положениях за одну установку, что снизило временные затраты на 30 %.

Восстановленные зубья ковша (рис. 22) устанавливались на экскаватор. В течение года проводилось наблюдение за интенсивностью износа и образованием дефектов. Результатами эксплуатационной проверки установлено, что износостойкость металла, наплавленного разработанными порошковыми проволоками, возросла в 1,2...2 раза по сравнению с деталями, наплавленными электродами марки ЭА-395/9 и заводскими деталями.

Годовой экономический эффект от внедрения разработанных наплавочных материалов (на примере Корфовского каменного карьера) составит 1 млн. 53 тыс. рублей.



Рис. 22 Наплавленный зуб ковша экскаватора

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и экспериментально подтверждена методика создания шихты порошковых проволок, заключающаяся в анализе требований, предъявляемых к сварочно-наплавочным материалам, комплексном исследовании

условий их реализации, а также указанной последовательности проведения экспериментов.

2. Доказана возможность замены металлических нитридообразующих элементов (алюминиевый порошок, ферротитан) циркониевым концентратом ( $ZrO_2$ ), обеспечивающим защиту расплавленного металла от воздействия азота. При этом сформированные покрытия содержат до 0,37 мас. % циркония (патент № 60888).

3. Установлено, что предложенная газошлакообразующая защита с использованием циркониевого концентрата и графита обеспечивает минимальные потери марганца, составляющие всего 20-30 %, а также позволяет формировать высоколегированные покрытия.

4. Получены регрессионные зависимости, описывающие закономерности перехода легирующих элементов (марганец, цирконий и углерод) из шихты в наплавленный металл, что позволяет прогнозировать их состав в формируемых покрытиях.

5. На основе полученных регрессионных зависимостей коэффициентов перехода легирующих элементов из шихты в наплавленный металл проведена оценка эффективности использования газошлакообразующей защиты, показателем которой являются потери марганца на угар, составляющие всего 10-20 %.

6. Установлены регрессионные зависимости, позволяющие прогнозировать твердость и износостойкость наплавленного металла, при этом износостойкость формируемых слоев повышается в 1,2...1,5 раз в сравнении с покрытиями, формируемыми наплавкой стандартными электродами ЭА-395/9, предназначенными для восстановления деталей из стали 110Г13Л.

7. Разработан состав шихты порошковой проволоки, обеспечивающий формирование высоколегированного слоя, соответствующего по химическому составу стали 110Г13Л, обладающего износостойкостью в условиях эксплуатации, превышающей износостойкость стандартных электродов в 1,2...1,3 раза.

8. По результатам технико-экономического анализа установлено, что годовой экономический эффект от использования разработанной порошковой проволоки при ремонте рабочих поверхностей строительно-дорожных машин (на примере Корфовского каменного карьера) составит 1 млн. 53 тыс. рублей.

#### Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Макиенко, В.М. Влияние компонентов шлаковой системы порошковых проволок на технологичность процесса наплавки и механические свойства наплавленного металла [Текст] / В.М. Макиенко, Д.В. Строителев, Е.М. Баранов, И.О. Романов // Сварочное производство. – М. : ОАО "Издательство "Машиностроение", Ежемес. – 2006, № 10, С. 7-10.

2. Макиенко, В.М. Порошковая проволока для наплавки зубьев ковшей экскаваторов с использованием минерального сырья Дальневосточного ре-

гиона [Текст] / В. М. Макиенко, И.О. Романов, Д.В. Строителев, В.Ф. Клиндух // Ремонт, восстановление, модернизация. – М. : ООО «Издательство «Наука и Технологии», Ежемес. – 2008, № 1, С. 7-11.

3. Макиенко, В.М. Использование циркониевого сырья для сварочных материалов [Текст] / В. М. Макиенко, Д.В. Строителев, И.О. Романов, А.Д. Верховуров // Технология металлов. – М. : ООО «Издательство «Наука и Технологии», Ежемес. – 2008, № 2, С. 22-26.

4. Макиенко, В.М. Получение шлаковой системы порошковой проволоки из минерального сырья Дальневосточного региона [Текст] / А. Д. Верховуров, В. М. Макиенко, Д. В. Строителев, И.О. Романов // Химическая технология. – М. : ООО "Издательство "Наука и Технологии", Ежемес. – 2007, № 10, С. 433- 442.

5. Григоренко, В.Г. Новая порошковая проволока для восстановления крестовин [Текст] / В.Г. Григоренко, В.М. Макиенко, Д.В. Строителев, И.О. Романов // Путь и путевое хозяйство. – М. : Орган ОАО «Российские железные дороги», ГУП РМ «Красный октябрь», Ежемес. – 2007, № 8, С. 37- 39.

6. Патент 55319 Российской Федерации, МПК В 23 К 35/368. Порошковая проволока [Текст] / Макиенко В.М., Григоренко В.Г., Строителев Д.В., Романов И.О. ; заявитель и патентообладатель Дальневосточный государственный университет путей сообщения – 2006104131/22; заяв.10.02.2006; опубл. 10.08.2006. Бюл. - № 22.

7. Патент 60888 Российской Федерации, МПК В 23 К 103/02. Порошковая проволока [Текст] / Макиенко В.М., Баранов Е.М., Строителев Д.В., Романов И.О.; заявитель и патентообладатель Дальневосточный государственный университет путей сообщения 2006133705/22; заяв.20.09.2006; опубл. 10.02.2007. Бюл. - № 4.

8. Макиенко, В.М. Разработка состава шихты порошковой проволоки из минерального сырья Дальневосточного региона [Текст] / В.М. Макиенко, Е.М. Баранов, Д.В. Строителев, И.О. Романов // Современные технологии железнодорожному транспорту и промышленности: сб. тр. 43-й Всерос. науч.-практ. конф. ученых транспортных вузов, инженерных работников и представителей академической науки, в 2 томах: Т. 1 // ДВГУПС. – Хабаровск, 2003. – С. 39-42.

9. Макиенко, В.М. Исследование перехода марганца в наплавленный металл с целью получения высокомарганцовистых порошковых проволок для наплавки крестовин стрелочных переводов [Текст] / В.М. Макиенко, Е.М. Баранов, Д.В. Строителев, И.О. Романов // Сварщик – профессионал.– М. Издательство ОАО "Машмир", Ежемес. – 2005, № 1, С. 18-20.

10. Макиенко, В.М. Разработка высокомарганцовистой порошковой проволоки для наплавки крестовин стрелочных переводов [Текст] / В.М. Макиенко, И.О. Романов, Д.В. Строителев, Е.М. Баранов // Проблема транспорта Дальнего Востока: тез. докл. шестой междунар. науч.-практич. конф. Владивосток. ДВО РАТ, 2005. С. 69.

11. Макиенко, В.М. Разработка износостойкой порошковой проволоки для наплавки крестовин стрелочных переводов [Текст] / В.М. Макиенко, И.О.

Романов, Д.В. Строителей, Е.М. Баранов, М.Ф.Пузанов // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» Труды четвертой международной конференции творческой молодежи 12-14 апреля 2005» - Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2005.- С. 32-34.

12. Макиенко, В.М. Исследование формирования шлаковой системы порошковых проволок на основе двуокиси циркония [Текст] / В.М. Макиенко, Е.М. Баранов, Д.В. Строителей, И.О. Романов // Сварщик – Профessional, М: Издательство ОАО «Машмир», Ежемес.– 2005, № 6, С. 8-10

13. Макиенко, В.М. Метод получения порошковых проволок из минерального сырья Дальневосточного региона [Текст] / В.М. Макиенко, Е.М. Баранов, Д.В. Строителей, И.О. Романов // Современные технологии железнодорожному транспорту и промышленности: сб. тр. 44-й всерос. науч.-практ. конф. // ДВГУПС; ред. кол. Ю.А. Давыдов. – Хабаровск, 2006. – С. 192-194.

14. Макиенко, В.М. Эффективность применения порошковых проволок из минерального сырья Дальневосточного региона [Текст] / В.М. Макиенко, Е.М. Баранов, Д.В. Строителей, И.О. Романов // Современные технологии железнодорожному транспорту и промышленности: сб. тр. 44-й Всерос. науч.-практ. конф. // ДВГУПС; ред. кол. Ю.А. Давыдов. – Хабаровск, 2006. – С. 194-195.

15. Макиенко, В.М. Влияние циркония на свойства наплавленного металла [Текст] / В.М. Макиенко, Е.М. Баранов, Д.В. Строителей, И.О. Романов // Современные технологии железнодорожному транспорту и промышленности: сб. тр. 44-й Всероссийской науч.-практ. конф. // ДВГУПС; ред. кол. Ю.А. Давыдов. – Хабаровск, 2006. – С. 196-198.

16. Grigorenko, V.G. Features of elaboration of welding – deposition flux-cored electrodes powder wires from the mineral raw material of the Far Eastern region [Текст] / V. G. Grigorenko, V. M. Makienko, D. V. Stroitelev, I.O. Romanov // Joint China-Russia symposium on advanced materials processing technology, Harbin, P.R. China. August 21-22, 2006

17. Романов, И.О. Критерии оценки восстановления циркония в процессе легирования металла при наплавке порошковыми проволоками [Текст] / И.О. Романов // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» Труды пятой международной конференции творческой молодежи 17-19 апреля 2007» - Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007.- С. 124-125.

