

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ  
АКАДЕМИЯ

На правах рукописи

ЖАРИКОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

УДК 621.791.92

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ САМОЗАЩИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ  
ПРОВОЛОКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ ШТАМПОВ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ  
ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСИ В НАПОЛНИТЕЛЬ

Специальность 05.03.06 – сварка и родственные процессы и технологии

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Гринь Александр Григорьевич  
к.т.н., доцент

Краматорск – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1 Причины неравномерности плавления порошковых проволок и пути ее устранения	12
1.2 Особенности нагрева и плавления сварочных экзотермических электродных материалов в процессе наплавки	16
1.3 Строение сварочных экзотермических электродных материалов	21
1.4 Современные газошлакообразующие основы наплавочных порошковых проволок и системы их легирования	25
1.5 Анализ условий работы вырубных штампов и материалов для их наплавки	31
1.6 Выбор и обоснование состава наплавленного металла	37
Выводы и постановка задачи исследования	42
РАЗДЕЛ 2. ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЙ И МЕТОДИК ИССЛЕДОВАНИЯ	44
2.1 Методики определения физических и технологических свойств шлаков	44
2.2 Методики определения сварочно-технологических характеристик порошковых проволок	49
2.3 Методики определения эффекта экзотермической реакции	53
2.4 Методика интегрального измерения сварочного тока	57
2.5 Методика оценки качества формирования наплавленного металла	59
2.6 Металлографические методы исследования наплавленного металла	60
Выводы по разделу 2	65
РАЗДЕЛ 3. ВЛИЯНИЕ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСИ НА ПРОЦЕСС ПЛАВЛЕНИЯ САМОЗАЩИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ	67
3.1 Эффективность тепловыделения при наплавке порошковой проволокой с экзотермической смесью	67
3.2 Эффективность расплавления и наплавки самозащитной порошковой проволокой с экзотермической смесью в сердечнике	72

3.3 Влияние экзотермической смеси в шихте сердечника порошковой проволоки на характер ее плавления и химическую неоднородность наплавленного металла	78
3.4 Влияние экзотермической смеси сердечника порошковой проволоки на состав и свойства шлака, образовавшегося при наплавке	86
Выводы по разделу 3	102
<b>РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА САМОЗАЩИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ С ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСЬЮ</b>	<b>104</b>
4.1 Усовершенствование состава газообразующей части наполнителя самозащитной экзотермической порошковой проволоки	104
4.2 Расчет состава самозащитной порошковой проволоки для наплавки штампового инструмента	120
4.3 Определение области режимов наплавки самозащитной порошковой проволокой с экзотермической смесью	123
4.4 Влияние экзотермической смеси на параметры сварного шва	129
Выводы по разделу 4	132
<b>РАЗДЕЛ 5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К НАПЛАВКЕ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА</b>	<b>134</b>
5.1 Расчет температуры предварительного подогрева при наплавке штампов холодной деформации металла	134
5.2 Исследования влияния экзотермической смеси на неметаллические включения и структуру наплавленного металла	138
5.3 Технологические особенности наплавки штампов	156
Выводы по разделу 5	158
<b>ОБЩИЕ ВЫВОДЫ</b>	<b>160</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>	<b>162</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b>	<b>180</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б</b>	<b>182</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В</b>	<b>184</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г</b>	<b>186</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Современное промышленное производство в Украине направленно на повышение качества продукции, снижение расхода материалов и энергозатрат. Одним из путей достижения этих целей является применение восстановительной наплавки штампового инструмента, выполняющего операции в холодном состоянии. При правильно выбранном составе наплавляемого металла указанный процесс позволяет не только восстанавливать инструмент, но и повышать его межремонтную и суммарную стойкость. Рабочая поверхность штампа должна обладать высокой ударной вязкостью и стойкостью к истиранию. Восстановление штампового инструмента наплавкой позволяет получить металл практически любого состава, имеющий высокие механические свойства, однако в связи с расширением номенклатуры конструкционных материалов, подвергаемых вырубке в холодном состоянии, появляется необходимость в повышении свойств наплавляемого металла и сварочно-технологических характеристик порошковых проволок. При этом экономится значительное количество легированной стали, снижаются энергозатраты и общая себестоимость продукции. Следовательно, разработка и совершенствование материала для восстановительной наплавки холодноштампового инструмента является актуальной задачей.

Для восстановительной наплавки холодноштампового инструмента широко применяются самозащитные порошковые проволоки. Однако одной из проблем применения самозащитных порошковых проволок является отставание плавления сердечника от оболочки. При больших скоростях подачи проволоки отставание является серьёзным недостатком, приводящим к попаданию нерасплавившегося сердечника в сварочную ванну, что в свою очередь вызывает засорение наплавленного металла неметаллическими включениями и появлению химической неоднородности. Это ухудшает свойства наплавленного металла и снижает стойкость штампового

инструмента.

Важным резервом улучшения характеристик плавления порошковых проволок и обеспечения равномерности плавления сердечника и оболочки является введение в состав их шихты экзотермических смесей [1, 2]. Отсутствие промышленного изготовления порошковых проволок с экзотермической смесью связано с недостаточным научным обоснованием ее производства и применения.

В связи с этим является актуальным проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований, направленных на определение состава и соотношения компонентов экзотермической смеси, теплового эффекта экзотермической реакции, разработку и изучение состава самозащитной порошковой проволоки, содержащей в шихте сердечника экзотермическую смесь и обеспечивающей металл наплавки с химической и структурной однородностью, низким содержанием неметаллических включений и высокой производительностью процесса наплавки.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Диссертационная работа выполнена согласно плану научно-исследовательской работы кафедры «Оборудование и технологий сварочного производства» Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА) в рамках госбюджетной темы Г-02-99 «Разработка и исследование самозащитных порошковых проволок для наплавки с экзотермической смесью в сердечнике» (№ ГР 0199U001564).

Тема диссертационной работы соответствует научной тематике кафедры «Оборудование и технологий сварочного производства» ДГМА в области разработки электродных материалов для наплавки.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является повышение эффективности процесса наплавки штампового инструмента путем введения экзотермической смеси в состав самозащитной порошковой проволоки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие

основные задачи:

1. Изучить теоретические предпосылки применения и определить оптимальный состав и соотношение компонентов экзотермической смеси, обеспечивающий управляемую экзотермическую реакцию с тепловым эффектом достаточным для подогрева сердечника самозащитной порошковой проволоки.

2. Выбрать, усовершенствовать и разработать методики исследования сварочно-технологических свойств порошковой проволоки.

3. Исследовать влияние экзотермической смеси на характеристики плавления, размеры зоны проплавления при наплавке порошковой проволокой, химическую неоднородность наплавленного металла, физические и технологические свойства шлаков.

4. Разработать состав самозащитной экзотермической порошковой проволоки и технологию наплавки холодноштампового инструмента.

5. Исследовать влияние состава самозащитной порошковой проволоки на структуру и свойства наплавленного металла и температуру предварительного подогрева.

**Объект исследования** – процесс упрочнения штампового инструмента, выполняющего операции вырубки в холодном состоянии, наплавкой его рабочих поверхностей самозащитной порошковой проволокой с экзотермической смесью.

**Предмет исследования** – сварочно-технологические свойства самозащитной порошковой проволоки с экзотермической смесью.

**Методы исследований.** Основные задачи работы решали аналитическими и экспериментальными методами. Экспериментальные образцы самозащитной экзотермической порошковой проволоки изготавливали на волочильном однобарабанном стане в лаборатории сварки кафедры «Оборудование и технологии сварочного производства» ДГМА.

Основой для теоретических исследований послужили работы известных ученых в области разработки наплавочных материалов И. К. Походни, В. М. Карпенко, В. В. Чигарева, В. Н. Шлепакова,

А. Д. Размышляева, Н. Г. Ефименко.

При выборе состава экзотермической смеси использована методика определения эффекта экзотермической реакции, позволяющая произвести оценку теплового эффекта взаимодействия элемента - раскислителя с окислителем.

Для оценки влияния экзотермической смеси в шихте на характеристики плавления самозащитной порошковой проволоки применена методика интегрального измерения сварочного тока на достаточно протяженном временном интервале.

Для оценки химической неоднородности металла наплавки производилось определение равномерности распределения хрома по толщине наплавки. Определение содержания хрома выполнялось на рентгеноспектральном микроанализаторе фирмы САМЕСА.

Исследования физических и технологических свойства шлаков проводили по стандартным методикам. Исследование строения шлаков и определение температуры плавления шлака производилось при нагреве в высокотемпературном микроскопе типа АЛА-ТОО. Измерение вязкости шлака производили на ротационном вискозиметре с вращающимся рабочим телом. Для определения поверхностного натяжения расплавленного шлака использовался метод максимального давления в газовом пузырьке. Оценку отделимости шлакового покрытия производили по площади отделившегося шлака с применением маятникового копра МК-30а. Идентификацию фаз проводили при помощи рентгеновского анализа с использованием камеры Дебая на рентгеновской установке УРС - 50ИМ.

Оптимизация состава газообразующей части наполнителя самозащитной экзотермической порошковой проволоки и определение области технологически приемлемых режимов наплавки проводились с использованием методов математического планирования эксперимента и статистической обработки результатов на ПВЭМ с использованием пакета прикладной программы Statistica 6 компании StatSoft.

Для оценки качества формирования наплавленного металла разработана методика, позволяющая получить относительную количественную оценку качества формирования металла при сравнении технологических свойств наплавленного металла и электродных материалов.

Анализ неметаллических включений в наплавленном металле и его структуры проводился с помощью металлографического микроскопа МИМ – 8М. Определение химического состава наплавленного металла производили с помощью оптико-эмиссионного анализатора химического состава РМІ-MASTER PRO. Твердость металла наплавки определяли по методу Роквелла с помощью прибора ТК – 2. Исследования структуры производили с использованием системы анализа изображений макро - и микроструктуры материалов SIAMS 700 на базе управляющей программы SIAMS Photolab.

#### **Научная новизна.**

1. Впервые установлен и обоснован состав самозащитной экзотермической порошковой проволоки (СЭПП) и количественные пределы экзотермической смеси в шихте проволоки, обеспечивающие протекание экзотермической реакции с тепловым эффектом, существенно влияющим на выравнивание скорости ее плавления с оболочкой.

2. Разработаны новые методики: методика интегрального измерения сварочного тока, которая базируется на сравнении компаратором напряжения на выходе интегратора с опорным напряжением; методика оценки качества формирования наплавленного валика, которая основана на соотношении трех его геометрических характеристик, обеспечивающие количественную оценку результатов исследований с высокой достоверностью.

3. Получили дальнейшее развитие методики расчета изменения температуры нагрева сердечника и коэффициента расплавления, которые базируются на уравнении теплового баланса плавления самозащитной порошковой проволоки, что позволяет регулировать их величину за счет варьирования содержания экзотермической смеси в составе СЭПП.

4. Впервые установлено, что применение экзотермической смеси в



составе самозащитной порошковой проволоки более 35 % повышает удельное тепловложение в единицу времени и температуру подогрева сердечника. Теплота экзотермической реакции изменяет условия нагрева и газовый состав дугового промежутка, что приводит к уменьшению сварочного тока на 12...15 % и повышению коэффициента наплавки на 10...13 %.

5. Теоретически и экспериментально доказано, что применение экзотермической смеси в составе порошковой проволоки влияет на равномерность распределения легирующих элементов в наплавленном металле, уменьшение размера неметаллических включений и их форму, снижение глубины проплавления в 1,4 раза, что обеспечивает его механическую однородность и достижение заданного химического состава уже во втором слое.

6. Впервые разработан и исследован состав газообразующей части СЭПП для наплавки штампового инструмента, позволяющий, за счет использования композиции карбонатов щелочных металлов, способных разлагаться в широком интервале температур, в количестве не более 2 % от состава проволоки и интенсификации нагрева сердечника, за счет использования экзотермической смеси, обеспечить равномерность плавления сердечника и оболочки проволоки, надежную защиту металла капли и ванны, снизить содержание газов в металле и обеспечить необходимую степень легирования (патент Украины № 93865).

#### **Практическая ценность полученных результатов.**

На основании теоретических и экспериментальных исследований, проведенных автором, доказано, что введение экзотермической смеси позволяет повысить производительность наплавки и снизить расход легирующих материалов. Разработан состав самозащитной экзотермической порошковой проволоки для наплавки штампового инструмента, выполняющего разделительные операции в холодном состоянии. Применение разработанного состава порошковой проволоки позволяет:

обеспечить равномерность плавления сердечника и оболочки, повысить производительность процесса наплавки и стойкость восстановленного штампового инструмента, за счет снижения количества неметаллических включений, изменения их формы и размеров, снижения химической неоднородности наплавленного металла. Разработаны новые методики и усовершенствованы существующие, обеспечивающие количественную оценку с высокой достоверностью результатов исследований, что позволяет регулировать содержание экзотермической смеси и изменение температуры нагрева сердечника. По результатам выполненных исследований проведены производственные испытания самозащитной экзотермической порошковой проволоки на ПАО «Энергомашспецсталь» при наплавке холодноштампового инструмента, а также результаты исследований внедрены в учебном процессе на кафедре «Оборудование и технологии сварочного производства» и «Технологий и оборудования литейного производства» ДГМА (г. Краматорск).

**Личный вклад соискателя.** Диссертанту принадлежат основные положения научной новизны, обоснование общей концепции работы, постановка цели и задач исследований, выбор объекта и предмета исследований, исследования по оптимизации состава самозащитной экзотермической порошковой проволоки, изготовление опытных партий порошковых проволок, наплавка в лабораторных и производственных условиях при личном участии, анализ полученных результатов и выводы по работе.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых научных работников «Современные сварочные и родственные технологии и их роль в развитии производства» (г. Николаев, УГМТУ, 2003 г.); Региональной научно – практической конференции «Сварочное производство и технический прогресс» (г. Николаев, УГМТУ, 2004 г.); III, V,

VI Всеукраїнських науково – технічних конференціях молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» (м. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 2005, 2009, 2011 рр.); X Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Технологія -2007» (м. Сєвєродонецьк, СТІ СНУ ім.В.Даля, 2007 р.); V, X Міжнародних науково - технічних конференціях «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, ДДМА, 2007, 2012 рр.); V Международной научно – практической конференции молодых ученых и специалистов «Интеллект молодых – производству 2007» (г. Краматорск, НКМЗ, 2007 р.); I, II Всеукраїнських науково - технічних конференціях студентів аспірантів і молодих науковців «Зварювання та спорідненні процеси та технології» (м. Миколаїв, НУК, 2008, 2012 рр.); II Международной научно-технической конференции «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития» (г. Краматорск, ДГМА, 2010 г.); Международной научно - технической конференции «Университетская наука 2012» (г. Мариуполь, ПГТУ, 2012 г.); Международной научно - технической конференции «Университетская наука 2013» (г. Мариуполь, ГУВЗ «ПГТУ», 2013 г.); IV Международной научно-технической конференции «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве» (г. Краматорск, ДГМА, 2013 г.).

**Публикации.** По результатам проведенных исследований опубликовано 28 научных работ: 8 статей в специализированных изданиях, входящих в перечень ВАК; 2 статьи в изданиях, включенных в международные наукометрические базы; 1 статья в электронном научном специализированном издании; 14 тезисов в сборниках докладов научно – технических конференций; получено 2 патента Украины на полезные модели.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 разделов, общих выводов по работе, перечня используемых источников и приложений. Общий объем работы составляет 179 страниц, 51 иллюстрация, 13 таблиц, 4 приложения, список используемых источников 170 наименований.

## РАЗДЕЛ 1

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 1.1 Причины неравномерности плавления порошковых проволок и пути ее устранения

Порошковая проволока, как и другие электродные материалы, должны удовлетворять целому ряду технических требований, определяющих возможность и целесообразность ее промышленного применения. К их числу относятся требования металлургического характера, например, получение металла шва требуемого состава и свойств, предотвращение дефектов металлургического происхождения в виде пор и трещин.

Технологические требования определяют необходимость обеспечения стабильного горения дуги, хорошего формирования шва и надежного сплавления с основным металлом, легкой отделимости шлаковой корки и малых потерь электродного металла на разбрызгивание, возможность сварки в различных пространственных положениях и ряда других характеристик. Порошковая проволока должна обеспечивать технико-экономическую эффективность ее применения в сравнении с другими сварочными материалами, изготавливаться из материалов доступных на Украине на промышленном оборудовании и отвечать санитарно-гигиеническим нормам процесса сварки и наплавки [3].

Порошковые проволоки используются для сварки без дополнительной защиты зоны сварки, а также для сварки в защитных газах, под флюсом и электрошлаковой. Проволоки для сварки без дополнительной защиты называются самозащитными. Входящие в состав сердечника таких проволок материалы при нагреве и расплавлении в дуге создают необходимую шлаковую и газовую защиту расплавленного металла [4, 5, 6].

Отсутствие необходимости применения дополнительной защиты зоны дуги и связанная с этим маневренность, возможность сварки в различных пространственных положениях, хорошие сварочно-технологические свойства, высокая производительность и качество сварки, нечувствительность к воздействию воздушного потока обеспечивает их преимущества перед порошковыми проволоками с дополнительной защитой зоны дуги и позволяет считать самозащитные проволоки одним из наиболее современных и универсальных сварочных материалов, которые используют в заводских условиях и на монтаже [6, 7, 8].

Достижение таких показателей стало возможным в связи с решением сложных физико-металлургических задач создания надёжной защиты металла, его раскисления, легирования и рафинирования в условиях, когда все указанные функции выполняются за счёт самой проволоки, её конструкции [4, 5, 9] и композиции сердечника [5, 6, 10, 11].

Характеристики дуги при сварке и наплавке порошковой проволокой существенно зависят от состава сердечника. Сердечник обладает низкой, по сравнению с металлической оболочкой, электропроводностью. По этой причине активное пятно дуги занимает не все сечение проволоки, а находится на оболочке или капле расплавленного металла. Оно, также как и столб дуги, хаотично, с изменяющейся скоростью перемещается вокруг сердечника. Сердечник плавится за счёт излучения дуги и конвективного теплообмена с расплавленным металлом и разогретыми газами. В связи с этим для сварки и наплавки порошковой проволокой характерно отставание плавления сердечника от оболочки [4, 5]. Экспериментальными исследованиями процесса нагрева оболочки и сердечника порошковых проволок для диапазона наплавочных режимов установлено, что температура нагрева оболочки, проходящим током изменяется в пределах 400...900 К, в то время как температура сердечника не превышает 350...500 К. Разность температур оболочки и сердечника возрастает с увеличением скорости подачи, вылета и диаметра проволоки [4, 12]. При больших скоростях подачи

проволоки отставание плавления сердечника от оболочки проволоки является серьёзным недостатком, приводящим к ухудшению сварочно-технологических показателей. Низкая теплопроводность отдельных компонентов порошкообразного сердечника проволоки, протекание эндотермических реакций при плавлении усугубляет данный недостаток [4, 5, 9]. Отставание плавления сердечника отрицательно сказывается на однородности и свойствах наплавленного металла, так как при наличии такого явления невозможно производить сварку на малом напряжении, а сварка на повышенном напряжении приводит к увеличению содержания азота в наплавленном металле и к снижению его механических свойств. Кроме того, попадание не расплавившегося сердечника в сварочную ванну вызывает засорение металла шва шлаковыми включениями. Отставание плавления сердечника от плавления оболочки увеличивается при повышении тока и напряжения [13].

Авторами ряда работ [5, 12 – 15] установлено, что для получения высокого качества металла шва и высокой производительности процесса сварки и наплавки необходимо обеспечить равномерное плавление сердечника и оболочки самозащитной порошковой проволоки, что может быть достигнуто следующим образом:

1. Увеличить электропроводность и скорость плавления сердечника за счет повышения содержания железного порошка. Однако значительное уменьшение доли неметаллических составляющих, образующих шлаковую и газовую защиту расплавленного металла, в самозащитных порошковых проволоках приводит к уменьшению надежной защиты металла. Поэтому достичь этого эффекта, при сохранении оптимального количества шлакообразующих и газообразующих материалов, можно за счет уменьшения толщины ленты.

2. Снизить температурную область плавления сердечника за счет изменения его химического состава: применением шлаковых систем эвтектического состава с низкой температурой плавления или введением в

сердечник плавней.

3. Снизить содержание шлакообразующих и газообразующих материалов, что приводит к повышению скорости плавления сердечника, однако это не всегда допустимо, так как приводит к ухудшению сварочно-технологических свойств проволоки и к снижению качества металла шва.

4. Изменить конструкцию проволоки. Например, есть рекомендации по изготовлению порошковых проволок в которых сердечник разделяется на несколько частей металлическими перегородками, электрически связанными с оболочкой проволоки, что обеспечивает горение дуги не только между наружной оболочкой и основным металлом, но и между металлическими перегородками внутри сердечника и основным металлом. При этом улучшаются условия подвода тепла к частицам сердечника, уменьшается толщина слоя материалов с низкой теплопроводностью, появляется возможность оптимального расположения защитных материалов по отношению к электродному металлу и стабилизируется процесс плавления проволоки. Однако такая конструкция порошковой проволоки значительно усложняет процесс ее изготовления и приводит к уменьшению коэффициента заполнения.

5. Увеличить тепловложение в сердечник самозащитной порошковой проволоки, за счет дополнительного подогрева:

- а) увеличить вылет проволоки при наплавке;
- б) подогреть от отдельного источника на участке ниже или выше подвода сварочного тока.

Тепло – и электропередача от оболочки в шихту, и как следствие показатели плавления проволоки, существенно изменяются в зависимости от теплопроводности шихты.

Важным резервом улучшения характеристик плавления самозащитных порошковых проволок (СПП) является введение в состав их шихты экзотермических смесей [10, 16, 17, 18].

Тепловой эффект экзотермических реакций, протекающих при

взаимодействии оксидов элемента, имеющего меньшую активность по отношению к кислороду, с элементом восстановителем, имеющим большее сродство к кислороду, в нашей стране и за рубежом широко применяется в ряде областей техники в качестве эффективного воздействия на технологические процессы: наплавки деталей [1, 19 – 23], сварки [2, 16, 18, 24 – 28], напыления и нанесения покрытий [29, 30], пайки металлов [31], термитной сварки рельсов [32 – 34], сварки чугуна [35], цветных металлов и сплавов [36], снятия термических напряжений в сварных швах [37, 38], подогрева соединяемых и наплавляемых деталей перед сваркой и наплавкой [38 – 39] и т.п.

## 1.2 Особенности нагрева и плавления сварочных экзотермических электродных материалов в процессе сварки (наплавки)

Плавление электродных материалов происходит за счет теплоты дуги; теплоты химических реакций, протекающих при плавлении наполнителей порошковой проволоки (покрытий электрода) и теплоты, выделяемой при прохождении тока через оболочку проволоки (стержень электрода). Однако, влияние теплоты химических реакций (в основном за счет окисления металлических составляющих наполнителя) на расплавление электродного материала изучено недостаточно [40].

При введении в наполнитель проволоки (покрытие электрода) оксидов железа и активных элементов - раскислителей протекает экзотермический процесс с выделением дополнительного тепла. Так как любой процесс раскисления является экзотермическим, то определение места его протекания является важным вопросом.

В тех случаях, когда при нагреве покрытия электрода происходит взаимодействие оксидов железа с элементами - раскислителями смеси,



экзотермический процесс протекает в покрытии электрода до расплавления электрода. При недостаточном для образования экзотермической смеси количестве в покрытии электрода оксидов железа и элементов - раскислителей экзотермический процесс протекает на стадии формирования и переноса капли [41]. При этом в первом случае будет наблюдаться ускоренное плавление покрытия и стержня электрода, а во втором – только увеличение температуры нагрева электродного металла при отсутствии повышенной скорости плавления электрода.

Для протекания экзотермической реакции необходимо, чтобы изобарный потенциал оксида активного металла, отнесенный к одному молю  $O_2$ , был значительно больше изобарного потенциала оксида восстанавливаемого металла. В этом случае теплосодержание системы  $M_kO_m + Me$  в процессе реакции будет уменьшаться, восстановительно-окислительный процесс пойдет с выделением тепла, вызывая разогрев продуктов реакции. Интенсивное протекание металлотермической реакции будет наблюдаться только в том случае, когда выделяющееся тепло способно значительно повысить температуру начала реакции и превысить критическую температуру ее начала. Так, реакция между порошком оксида железа и порошком Al весьма экзотермична; теплота, выделяющаяся при этом, вполне достаточна, чтобы в дальнейшем превысить критическую температуру ( $600^\circ C$ ) и обеспечить нормальное течение реакции [42].

В работе [2], рассматривающей влияние титанотермитной смеси, входящей в электродное покрытие, на повышение производительности сварки, отмечено постоянство значения коэффициента расплавления  $\alpha_p$  при увеличении количества титанотермитной смеси в покрытии до 60% ее относительной массы при постоянном его объеме. Дальнейшее увеличение количества смеси ведет к уменьшению  $\alpha_p$ , это указывает на протекание экзотермического процесса на стадии формирования и переноса капли.

Согласно исследованиям, проведенным в работе [41], на электродах для сварки низкоуглеродистых сталей, дополнительное количество тепла от

экзотермических реакций повышает активность компонентов покрытия и усиливает окислительно-восстановительные реакции. Зависимость содержания элементов на оплавленном торце электрода, в электродной капле и в наплавке от содержания их в электроде приближается к линейной. Расчет потерь элементов на различных стадиях переноса электродного металла [41] показывает, что взаимодействие элементов - раскислителей с оксидами покрытия происходит в основном при нагреве и плавлении покрытия на стадии формирования капли. На стадии капли и в сварочной ванне слабо развиваются кремне - и марганцевосстановительные процессы, которые не приводят к существенному восстановлению марганца и кремния из их оксидов.

В работе [24] отмечается, что введение в покрытие электродов экзотермической смеси увеличивает количество расплавленного стержня в пределах 14...20 г и покрытия от 8 до 11.8 г при постоянном коэффициенте массы покрытия. Это происходит за счет теплоты, выделяющейся при протекании экзотермической реакции, и снижении затрат теплоты на плавление покрытия вследствие уменьшения содержания газошлакообразующей части покрытия и увеличения металлической составляющей. Введение в состав покрытия до 53,4 % экзотермической смеси изменяет коэффициент нагрева электрода с 0,28 до 0,415. Причем изменение носит прямо пропорциональный характер.

Окислительно-восстановительные процессы, протекающие при плавлении электродов с экзотермической смесью, описываются следующим образом [41]. На стадии нагрева и плавления происходит диссоциация мрамора и оксида железа с выделением соответственно  $\text{CO}_2$  и свободного кислорода, с которыми взаимодействуют в основном алюминий и титан. Не прореагировавшие части алюминия и титана, а также марганца взаимодействуют с закисью железа. На стадии прохождения капли через дуговой промежуток в зонах наиболее высоких температур протекают окислительно-восстановительные процессы при взаимодействии элементов - раскислителей с оксидами шлака ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ), покрывающего каплю, по

известным реакциям, направление протекания которых зависит от концентрации взаимодействующих масс. Кроме того, с выделяющимся при диссоциации  $\text{CO}_2$  кислородом взаимодействует в основном алюминий. На стадии ванны происходит окисление алюминия и титана, не прореагировавших на предыдущих стадиях, при взаимодействии со шлаком, покрывающим сварочную ванну.

При наличии термитной смеси в шихте порошковой проволоки или ленты обеспечивается равномерное плавление сердечника и оболочки, снижается вероятность перехода не расплавившегося сердечника в сварочную ванну, увеличиваются коэффициенты расплавления и наплавки [1, 12].

С увеличением сварочного тока увеличивается нагрев оболочки порошковой проволоки на вылете, что способствует протеканию экзотермического процесса на большем расстоянии от торца. При этом диссоциация газообразующих компонентов протекает в основном до стадии капли, что нарушает газовую защиту расплавленного электродного металла. Значительное влияние на нагрев и плавление экзотермических электродных материалов оказывает строение экзотермической смеси, количество экзотермической смеси и соотношение компонентов смеси, их дисперсность. В зависимости от этих факторов экзотермический процесс может не протекать, протекать при сварке или протекать самопроизвольно.

Для самопроизвольной реакции выделившегося тепла в реакционном участке шихты должно быть достаточно для разогрева соседних с ним участков до температуры начала реакции [43]. Требуемая для этого величина теплоотводной способности шихты должна быть близкой к величине теплосодержания всех компонентов шихты при нагреве до температуры начала взаимодействия восстановителя с наиболее трудно восстанавливаемым оксидом, извлекаемого элемента или продуктом промежуточной реакции.

В работе [44] в качестве горючего вещества в экзотермической смеси применяются алюминиевый порошок, дисперсность которого 15...25 мкм, и

порошок - окислитель NiO. Выбранная дисперсность компонентов смеси обеспечивала наличие плотного и сплошного слоя, в котором под воздействием дугового разряда возникал волновой процесс – самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

В работе [24] в качестве экзотермической смеси применялся алюминиевый порошок и оксид железа. Исследования показали, что протекание экзотермических реакций в твердой фазе электродного покрытия происходит только при содержании в нем свыше 35% экзотермической смеси и тем интенсивнее, чем больше ее содержится в покрытии электродов. При меньшем содержании смеси экзотермические реакции не протекают.

Экзотермическая смесь, включающая магний и окислитель – кремний и дополнительно гидрид титана [45], при содержании магния более 67 мас. % и кремния до 26 мас. % горит неустойчиво, часть магния не окисляется, что приводит к снижению теплопередающего эффекта. При содержании магния до 58 мас. % и кремния более 30 мас. % смесь трудно воспламеняется, часть кремния не используется, что приводит к снижению теплопередающего эффекта. Экзотермический процесс протекает устойчиво при содержании: магния – 58...66 мас. %, кремния – 26...30 мас. %, гидрида титана – 8...12 мас. %.

Таким образом, для получения эффекта экзотермического процесса, способствующего выделению дополнительного тепла при сварке, без самопроизвольной реакции – эффекта "бенгальского огня", необходимо найти оптимальное соотношение компонентов смеси, которое позволит сделать экзотермическую реакцию управляемой.

### 1.3 Строение сварочных экзотермических электродных материалов

При определении состава экзотермической смеси важное значение имеет обоснованный выбор окислителя и восстановителя смеси, определяющих тепловой эффект и состав продуктов реакции, влияющих на сварочно-технологические характеристики процесса наплавки и свойства наплавленного металла.

В настоящее время разработано большое количество составов экзотермических смесей. В качестве окислителя чаще всего используют окалину или гематит  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [2, 18, 20, 21, 23, 24], окисленную марганцевую руду [43], оксиды хрома [43], оксиды никеля [44], оксид меди [31, 46], азотнокислый натрий, хлорноватокислый натрий или кальций [26, 43], а в качестве восстановителя алюминий [1, 16, 18, 24, 46], магний [35, 38, 39, 45], бор [1, 20, 31], титан [1, 2, 20], кремний [43], углерод [43].

Использование в качестве термитной смеси гематита и алюминиевого порошка позволяет увеличить производительность расплавления и наплавки на 20-30% выше по сравнению с наплавкой порошковыми проволоками без экзотермической смеси [20, 24]. В результате протекания экзотермической реакции при плавлении шихты СПП с экзотермической смесью, образующееся восстановленное железо поступает в шов, повышая производительность наплавки, а выделившееся тепло способствует ускорению плавления шихты и проволоки в целом. Температура реакции алюминия с  $\text{FeO}$  достигает  $2500^\circ\text{C}$ , а с  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  –  $2960^\circ\text{C}$ . Время протекания реакции зависит от массы термитной смеси (5...15 с при  $m = 3 - 10$  кг; 60...90 с при  $m = 800 - 1000$  кг) [26]. Наплавка с использованием такой экзотермической смеси позволяет в 6...8 раз уменьшить скорость охлаждения металла сварного соединения и избежать образование закалочных структур, а также уменьшить вероятность образования трещин [26]. При этом экономия электроэнергии составляет до  $150\text{кВт}\cdot\text{ч}$  на 1т.

наплавленного металла [1, 20].

Использование ферротитана и ферробора в термитной смеси позволяет увеличить количество железа в металле шва. При протекании экзотермической реакции железо восстанавливается из гематита, что в сочетании с железом, переходящим из ленты и ферросплавов обеспечивает увеличение коэффициента наплавки [1, 2]. Значение коэффициента расплавления порошковой проволоки зависит от величины тока и теплообмена оболочки с шихтой, что в свою очередь зависит от природы исследуемого в шихте восстановителя. Алюминиевый порошок в проволоке способствует интенсификации тепло- и электропередачи от оболочки к сердечнику, что приводит к уменьшению коэффициентов расплавления оболочки и порошковой проволоки. Введение ферробора и ферротитана снижает тепло- и электропередачу от оболочки в шихту, что способствует увеличению коэффициента расплавления оболочки и проволоки [17].

При термитной сварке и в литейном производстве также используются экзотермические смеси, в которых в качестве окислителей используют азотнокислый натрий, хлорноватокислый натрий или кальций, а в качестве восстановителя используют углерод, алюминий, ферросилиций, силикокальций и другие [43]. Для того чтобы реакция прошла до конца окислитель и восстановитель необходимо брать в весовых количествах, отвечающих стехиометрическим соотношениям.

По правилам техники безопасности температура воспламенения смесей не должна быть ниже  $250^{\circ}\text{C}$ . Для самопроизвольной реакции выделившегося тепла в реагирующем участке должно быть достаточно для разогрева соседних с ним участков до температуры начала реакции. Авторами указываются следующие температуры начала взаимодействия компонентов экзотермических смесей: Al и селитра –  $830\text{...}850^{\circ}\text{C}$ ; Mn и селитра –  $420\text{...}440^{\circ}\text{C}$ ; Ti и селитра –  $620\text{...}660^{\circ}\text{C}$  [43]. При легировании наплавленного металла могут также использоваться экзотермические смеси, в которых в качестве окислителей используются оксиды элементов (например NiO, CuO,

$\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), легирование которыми необходимо обеспечить. Г.И. Ксандопуло и А.В. Яровчук предлагают экзотермическую смесь, в которой в качестве восстановителя использовался алюминиевый порошок марки АДС-1, дисперсность которого 15...25 мкм, а в качестве окислителя порошок  $\text{NiO}$ , содержащий 78,57%  $\text{Ni}$  (монооксид никеля) [44]. Выбранная дисперсность компонентов обеспечивала условие для максимального восстановления оксида никеля, введение наибольшего количества восстанавливаемого в процессе синтеза элемента в металл шва и формирование плотного и сплошного слоя, в котором под действием дугового разряда возникал волновой процесс – самораспространяющийся высокотемпературный синтез. Максимальное количество никеля, поступающего в металл шва равно 2,75%. Коэффициент легирования никеля возрастает лишь при увеличении содержания смеси в шихте до 15%, после чего остается постоянным. Потери никеля возрастают с увеличением содержания экзотермической смеси в шихте, что объясняется как заметным повышением температуры сварочной ванны за счет экзотермической реакции, так и усиленным выгоранием оксидов никеля.

В работе [45] в качестве экзотермической смеси используется состав, включающий магний и окислитель, в качестве которого служит кремний и дополнительно гидрид титана при следующем соотношении ингредиентов, мас. %: магний – 58...66, кремний – 26...30, гидрид титана – 8...12. Кремний в смеси с магнием образует силицид магния, который самопроизвольно окисляется на воздухе с выделением тепла. Гидрид титана повышает основной теплопередающий эффект за счет того, что выделяющийся при разложении гидрида титана водород взрывает смесь, способствуя притоку кислорода вглубь нее. Экзотермическое взаимодействие между кремнием и магнием происходит в интервале температур 800...850 К, что значительно ниже температуры начала взаимодействия магния с железной окалиной. Использование гидрида титана способствует увеличению основного теплопередающего эффекта на 20...30%. В его отсутствие окисление

силицида магния протекает только с наружной поверхности экзотермической смеси и поэтому происходит не полностью.

Для снятия термических напряжений и подогрева соединяемых и наплавляемых деталей перед сваркой и наплавкой применяют экзотермическую смесь [38, 39] в которой в качестве окислителя используют асбест хризопеловый, а в качестве металлического горючего магний или его смесь с алюминием.

Однако в чистом виде термитный металл представляет собой железо с малой прочностью и твёрдостью. Так механические свойства металла шва, выполненные термитной сваркой ( $\sigma_{\text{в}}=400\text{...}500$  МПа;  $\delta_{\text{с}}=8\text{...}12\%$ ,  $\alpha_{\text{н}}=200\text{...}330$  кДж/м<sup>2</sup>) [47], значительно уступают качеству металла шва, выполненного ручной дуговой сваркой, из-за наличия в нём значительного количества неметаллических включений в связи с большой скоростью реакции, тугоплавкостью и дисперсностью шлаковых частиц, а также неудовлетворительного отделения шлака от металла при данном процессе. Улучшение механических свойств термитного металла достигается введением в термитные смеси соответствующих добавок. В работах [48 – 49] отмечается о положительном влиянии редкоземельных металлов на свойства соединений, сваренных термической сваркой, а так же рекомендуется вводить до 2...5% оксидов натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) и кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Последний образует над смесью кислый шлаковый покров, растворяющий свободную закись железа ( $\text{FeO}$ ) и переводящий её в не распадающийся при температуре процесса силикат  $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ . Так как натрий значительно снижает температуру затвердевания шлака, его защитное влияние долго сохраняется при остывании [48]. Для предотвращения образования сульфида железа, выделяющегося в виде сетки на границах зёрен и ухудшающего прочность сварного соединения, к смеси для обессеривания добавлялись 1...5%  $\text{CaO}_2$  и 1...3%  $\text{CaF}_2$ , благодаря чему повышалась плавкость образуемого шлака. В работе [50] с целью повышения прочности сварного соединения, улучшения воспламенения и формуемости состав термитной смеси содержит 1...5%



политетрофторэтилена. С целью улучшения отделимости шлаковой корки, снижения чувствительности к порообразованию шихта содержит 3,5...6 % фторида бария и 3,5...6 % фторида лития [51].

Таким образом экзотермические смеси, используемые для дополнительного тепловложения в сварочные материалы, имеют различный состав, строение, обладают разным тепловым воздействием, что затрудняет их эффективное применение в составе наполнителя самозащитных порошковых проволок.

#### 1.4 Современные газослакообразующие основы наплавочных порошковых проволок и системы их легирования

В самозащитных порошковых проволоках газовая и шлаковая защита расплавленного металла осуществляется за счет диссоциации и расплавления в дуговом промежутке газослакообразующих компонентов. Состав газослакообразующей части сердечника порошковой проволоки оказывает значительное влияние на содержание газов и неметаллических включений в металле наплавки [4, 52 – 54], перенос электродного металла [55, 56], характер плавления и качество наплавленного металла [55, 57, 58], переход легирующих элементов в наплавленный металл [14, 55, 59], формирование наплавленного валика и отделимость шлакового покрытия [4, 52, 60 – 62], раскисляющую [11, 60] и рафинирующую [11] способности.

Для сварки открытой дугой применяются самозащитные порошковые проволоки преимущественно трех типов: рутил - органического, карбонатно - флюоритного и флюоритного [4, 6, 11, 63].

Сердечник проволоки рутил - органического типа состоит, в основном, из рутилового концентрата и алюмосиликатов, которые применяются в качестве шлакообразующих материалов. Газообразующими материалами

служат целлюлоза, крахмал и другие органические вещества. Газообразующие материалы органического происхождения диссоциируют при низких температурах [14], то есть до попадания в зону плавления. Следовательно, защита расплавленного металла недостаточно надежна при использовании указанных типов проволоки.

В качестве раскислителей используется преимущественно марганец. Использование для раскисления элементов, обладающих большим сродством к кислороду в композициях проволок этого типа, приводит к пористости. Легирование возможно только элементами, обладающими малым сродством к кислороду (Mo, Cu). Поэтому проволоки рутил - органического типа рекомендуются, в основном, для сварки низкоуглеродистых конструкционных сталей [6].

Шлаки, образующиеся при плавлении проволок рутил - органического типа, по основным составляющим относят к системам  $TiO_2 - SiO_2 - Al_2O_3$ ,  $TiO_2 - SiO_2 - MgO$  с преобладающим содержанием диоксида титана. Так как шлак имеет кислую реакцию и наличие щелочных оксидов (в основном в составе алюмосиликатов – силикаты калия и натрия), то проволоки рутил - органического типа обладают стабильным горением дуги и хорошими сварочно-технологическими свойствами.

В проволоках этого типа защита от кислорода воздуха обеспечивается за счет содержания в сердечнике активных раскислителей. Газообразующие органические материалы легко разлагаются в дуге и образуют защитную среду, содержащую водород. Использование проволок данного типа не обеспечивает равномерного покрытия наплавленного валика шлаком, что, в сочетании с высоким содержанием водорода, способствует повышению газонасыщенности металла. Известно [40], что склонность к пористости повышается при сварке сталей с высоким содержанием кремния, при добавках в проволоку таких раскислителей как: углерод, кремний, титан, алюминий, которые в значительных количествах находятся в наплавочных материалах. При сварке на повышенных режимах наблюдаются газовые поры

в корне шва и кратере [5, 6].

Состав металла, наплавленного проволокой рутил - органического типа, близок к составу полуспокойной стали. Изменение сварочного тока мало сказывается на содержании марганца, кремния и углерода в металле шва. С увеличением напряжения дуги снижается содержание марганца и, в меньшей степени, углерода и кремния [14]. Коэффициенты расплавления и наплавки возрастают с увеличением сварочного тока и остаются практически одинаковыми при изменении напряжения дуги в пределах применяемого диапазона.

Сварка проволокой рутил - органического типа выполняется на постоянном токе обратной полярности, хотя имеется возможность сварки на переменном токе. Проволока этого типа характеризуется относительно небольшим проваром, малой склонностью к пористости при наличии ржавчины, окалина и увлажнения поверхности свариваемого металла, что делает предпочтительным ее применение при сварке ответственных конструкций на открытых площадках и на монтаже [6, 14]. Основным недостатком проволок этого типа – ограниченная производительность, связанная с ухудшением качества швов и образованием пористости при сварке токами высоких плотностей.

Самозащитные порошковые проволоки карбонатно - флюоритного и флюоритного типов обеспечивают при сварке высокий уровень раскисления, низкое содержание кислорода и неметаллических включений в металле шва. Степень легирования металла может быть высокой, поэтому эти типы проволок используют для сварки сталей различных классов и для наплавки [14].

Для порошковых проволок карбонатно - флюоритного типа в качестве газообразующих материалов применяют карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов, которые при диссоциации образуют оксид металла и углекислый газ. Оксиды, образующиеся при диссоциации карбонатов создают дополнительную шлаковую защиту расплавленного

металла [6, 64]. В качестве шлакообразующих материалов используют рутиловый концентрат и фтористый кальций. Раскисление и легирование осуществляется за счёт введения в состав сердечника проволоки ферромарганца, ферротитана, ферросилиция, алюминия. Проволоки этого типа обеспечивают низкое содержание кислорода и неметаллических включений в металле шва [6, 14, 65].

Шлаковые системы имеют вид:  $\text{CaO} - \text{CaF}_2 - \text{TiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$ ;  $\text{CaO} - \text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{MgO} - \text{CaF}_2 - \text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO} - \text{CaF}_2 - \text{SiO}_2$ . Недостатком проволок с такими шлаковыми системами является их склонность к пористости при удлинении дуги вследствие насыщения наплавленного металла азотом.

Повышение уровня защиты металла от азота при наплавке длинной дугой в проволоках флюоритного и реже карбонатно - флюоритного типов обеспечивается введением в состав проволоки нитридообразующих элементов (титан, алюминий, цирконий). Эти элементы связывают азот на стадии ванны в стойкие нитриды, тем самым, предотвращая пористость [6, 14]. При высоких напряжениях дуги в металле швов, легированных титаном и алюминием, фиксируется значительное количество азота в виде нитридов титана и алюминия, что резко снижает пластичность металла. Недостаточное количество нитридообразующих элементов приводит к образованию большого количества пор, поэтому их содержание в металле шва необходимо строго контролировать. Механические свойства металла шва в присутствии нитридообразующих несколько снижаются. Значительное насыщение металла азотом объясняется тем, что шлаки, образующиеся при сварке и наплавке этими проволоками, плохо защищают капли электродного металла от взаимодействия с азотом воздуха [14]. По той же причине происходит большое поглощение кислорода и водорода металлом сварочной ванны.

Так как титан и алюминий являются так же активными раскислителями, то введение их в порошковые проволоки для борьбы с пористостью, вызываемой азотом, уже предопределяет низкое содержание

кислорода в металле. В этих условиях кремний и марганец, обладающие меньшим сродством к кислороду играют роль легирующих элементов и используются для регулирования прочностных показателей металла шва. Их коэффициенты перехода близки к единице.

Снижение содержания азота в металле шва может быть также достигнуто в результате рационального выбора состава газообразующей части сердечника проволоки. Применение комплекса газообразующих, а также легкоплавких смесей шлакообразующих материалов позволяет изменить кинетику газообразования, предотвратить его взрывной характер, обеспечивая при этом равномерное и полное разложение карбонатов и раннее образование шлакового расплава [6].

Применение проволок карбонатно - флюоритного и флюоритного типов требует очистки свариваемого металла от ржавчины и загрязнений. Недопустимо также увлажнение и корродирование сердечника. Сварку проволокой карбонатно - флюоритного типа выполняют на постоянном токе обратной полярности при питании от источника сварочного тока с жесткой внешней характеристикой. Эти проволоки высокопроизводительны и допускают применение большой плотности тока.

В качестве наплавочных порошковых проволок, в основном, применяются проволоки рутил - карбонатно - флюоритного типа [66 – 68]. Эти проволоки обеспечивают хорошие сварочно-технологические свойства в широком диапазоне составов наплавленного металла, высокий уровень раскисления, низкое содержание газов и неметаллических включений в металле шва (наплавки). Степень легирования металла может быть высокой, в связи с чем эти типы порошковых проволок применяются для сварки сталей различного класса и наплавки. Шлаковую основу этих проволок относят к системе:  $\text{CaF}_2 - \text{CaO} - \text{TiO}_2 - \text{R}_2\text{O}$ . Рутиловый концентрат, как шлакообразующий компонент, так же как и карбонаты, не является нейтральным по отношению к металлу, а способен в той или иной степени химически взаимодействовать с ним и окислять его. Входящий в состав

сердечника проволоки фторид кальция является хорошим флюсующим агентом, который способствует снижению содержания в металле неметаллических включений и водорода. Наличие в сердечнике основных оксидов благоприятно с точки зрения удаления серы и фосфора из металла.

Практика показывает [14, 55, 69], что содержание газообразующих материалов в составе сердечника не должно превышать 13...14 % массы проволоки. Увеличение количества газошлакообразующих материалов неэффективно с точки зрения улучшения защитных свойств порошковой проволоки и приводит к увеличению потерь электродного металла и нарушению стабильности процесса. При этом происходит увеличение длины участка отставания плавления сердечника от оболочки, что сказывается на химической однородности наплавленного металла.

В работах [66, 70 – 73] показана возможность применения в качестве шлакообразующих материалов самозащитных порошковых проволок для наплавки легированных сталей (взамен рутилового концентрата) таких компонентов, как перовскитового и нефелинового концентратов, вермикулита, волластонита и перлита.

Нефелиновый концентрат содержит значительное количество оксидов, что способствует улучшению отделимости шлаковой корки и стабильности протекания дугового процесса [72, 74]. Вермикулит используется с целью улучшения уплотняемости сердечника порошковой проволоки [73, 75]. Перовскитовый концентрат применяется в качестве шлакообразующего компонента [59, 70, 71]. В качестве основного минерала он содержит титанат кальция  $\text{CaTiO}_3$ , а в качестве примесей – около 3% оксидов редкоземельных металлов. Из литературных данных [76, 77] известно, что оксиды РЗМ интенсивно испаряются при высоких температурах (1960...2670 К). Образовавшиеся в дуговом разряде пары этих оксидов дополнительно оттесняют воздух от дугового промежутка, снижая возможность взаимодействия компонентов воздуха с расплавленным металлом.

Оценка шлаковых систем с применением этих компонентов по

сварочно-технологическим свойствам и качеству наплавленного металла показывает, что лучшую отделимость шлаковой корки при наплавке комплексно-легированного сплава обеспечивает шлаковая система содержащая  $TiO_2$  или его соединения. Наибольшие коэффициенты перехода Mn и Si при легировании наплавленного металла этими элементами имеют проволоки, газшлакообразующая основа которых состоит из плавикового шпата, мрамора и нефелинового концентрата ( $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ) [76, 77].

Таким образом, из анализа литературных данных следует, что для наплавки легированных инструментальных сплавов целесообразно использовать самозащитные порошковые проволоки рутил – карбонатно – флюоритного типа, которые наряду с получением наплавленного металла необходимой степени легирования, обеспечивают высокие сварочно-технологические свойства, низкое содержание газов и неметаллических включений, высокое качество наплавленного металла, достаточную раскисляющую и рафинирующую способность, хорошее формирование валиков и отделимость шлаковой корки.

### 1.5 Анализ условий работы вырубных штампов и материалов для их наплавки

Холодная штамповка является одним из наиболее прогрессивных способов получения деталей. В настоящее время она находит широкое применение во всех отраслях машиностроения, приборостроительной, радиотехнической, электронной и металлообрабатывающей промышленности.

Однако экономическая целесообразность использования холодной штамповки в значительной мере определяется стоимостью штампов, приходящейся на единицу изделия, величина которой в основном

обуславливается их стойкостью [78, 79].

В штампах для разделительных операций наибольшему износу подвергаются режущие кромки пуансона и матрицы. Затупление режущих, кромок разделительных штампов приводит к образованию заусенцев на деталях.

Рабочие детали штампов (пуансоны и матрицы) работают обычно в условиях ударной нагрузки с сильной концентрацией напряжений на рабочих кромках или на рабочей поверхности, при высоких давлениях; часто они имеют сложную форму, которую необходимо сохранить при термической обработке. Поэтому к рабочим частям (пуансонам и матрицам) штампов для резки предъявляются определенные требования, основными из которых являются следующие: способность металла противостоять большому давлению к ударам, хорошо сопротивляться износу от трения, сохранять острые режущие кромки без разрушения и затупления возможно больший период времени, а также иметь сравнительно невысокую стоимость [78, 80].

Стойкость стальных рабочих деталей штампа зависит от количества остаточного аустенита в стали и карбидной неоднородности. Стойкость стальных матриц в зависимости от сложности штампуемых деталей и испытываемых удельных давлений составляет в среднем 2...10 тыс. шт., стойкость пуансонов 2...15 тыс. шт. [80].

Увеличение срока службы штампового инструмента возможно следующими путями [78, 80, 81, 82]:

- 1) Изысканием новых более стойких марок сталей и сплавов.
- 2) Применением составных и сварных конструкций пуансонов и матриц.

В этих штампах основание изготавливается из стали 20, а рабочие части – из инструментальной углеродистой стали или легированной стали соответствующих марок. При такой конструкции значительно упрощается изготовление рабочих частей по сравнению с изготовлением цельной матрицы, улучшаются условия термообработки отдельных частей пуансона



или матрицы, создается возможность быстрой замены отдельных сломавшихся частей новыми вместо замены всей матрицы или пуансона, вследствие чего можно сэкономить дефицитную и дорогостоящую сталь.

### 3) Изготовлением штампов с применением наплавки.

Штампы холодной штамповки, изготовленные с применением наплавки, обладают рядом преимуществ, обусловленных тем, что высокие требования, предъявляемые к материалам штампов, относятся преимущественно к их рабочему слою, а материал корпуса штампа должен обладать, в основном, лишь достаточной прочностью и вязкостью. Поэтому оптимальной является конструкция штампов, у которых корпус изготовлен из низколегированной или углеродистой стали, а на рабочую поверхность наплавлен слой износостойкого материала. В этом случае повышается стойкость штампов, появляется возможность многократного восстановления изношенных и обеспечивается экономия легированных сталей.

### 4) Восстановление изношенного инструмента методом наплавки.

В настоящее время для восстановления штампов, когда необходимо наплавить большое количество металла, применяется электродуговая наплавка [81, 83, 84 – 88, 89]. При правильно выбранном составе наплавляемого металла она позволяет не только восстанавливать инструмент (что в несколько раз увеличивает его суммарную стойкость), но и повышает его межремонтную стойкость. При этом экономится значительное количество легированной стали, а предприятия освобождаются от необходимости дополнительного изготовления трудоемкой оснастки.

Процесс наплавки вырубных штампов обеспечивает удовлетворительную обрабатываемость наплавленного металла, возможность ведения процесса без предварительного подогрева, упрощение технологии термической обработки штампов, получение наплавленного металла с твердостью не ниже HRC 52...55 и повышение стойкости штампов не менее чем в 2 раза [79, 83].

Экономическая эффективность применения наплавки штампов на

предприятиях машиностроения выражается в следующем: снижение расхода штамповой стали в 5...6 раз; сокращение количества ремонтов в 1,5...2 раза; уменьшение трудоемкости восстановления штампов в 4...5 раз [89].

Для восстановления штампового инструмента наплавкой широко применяются порошковые проволоки [79, 86, 87, 90].

ИЭС им. Е. О. Патона для вырубных штампов холодной штамповки рекомендуется наплавка самозащитной порошковой проволокой ПП-АН140, обеспечивающей получение наплавленного металла типа 60X8C2PT с твердостью HRC 58...60. Структура наплавленного металла – мартенсит и карбиды с умеренным количеством остаточного аустенита [91, 92]. Однако наплавленный этой порошковой проволокой металл слабо поддается термообработке, а высокое содержание кремния приводит к образованию трещин; металл наплавки склонен к охрупчиванию, вследствие появления карбидной сетки [93].

Для восстановительной наплавки мелких штампов для холодной штамповки в закаленном состоянии разработана и внедрена в производство технология аргонодуговой и микроплазменной наплавки с использованием в качестве присадочного материала порошковой проволоки ПП-АН148 [91]. Потеря массы на изношенном участке рабочей поверхности мелкого штампа, преимущественно в виде выкрашивания, скола, борозды и т.п., обычно не превышает 2...6% от общей массы штампа. Подобные малые объемы металла необходимо наплавлять так, что бы уже в первом слое получить твердость не ниже твердости материала штампа ( $HRC \approx 60$ ). Указанная технология обеспечивает получение наплавленного металла типа 80X12K4Ф3M2B2HP с твердостью HRC 58...60 уже в первом слое металла наплавки. Структура наплавленного металла – мартенсит с умеренным количеством аустенита; упрочняющая фаза – карбиды и бориды хрома, вольфрама и молибдена, а также интерметаллиды Fe - Co - Mo, Fe - W - Mo. Такая структура обеспечивает получение наплавленного металла высокой твердости, однако ударная вязкость при этом относительно невысокая (до 14 Дж/см<sup>2</sup>).

Для наплавки хромистых сталей используют порошковые проволоки ПП-Х12В1Ф и ПП-Х12ВФТ, обеспечивающие наплавленный металл с твердостью более 60 НРС. Однако эти стали обладают повышенной склонностью к хрупкому разрушению, так как при наплавке проявляют низкую ударную вязкость 80...120 кДж/м<sup>2</sup> [15, 94].

Для наплавки штампового инструмента без предварительного подогрева авторами [79, 95] рекомендуется порошковая проволока ПП-0Х6Н8М7С, обеспечивающая отсутствие трещин в наплавленном металле и ЗТВ, при твердости наплавленного металла после старения 52...55 НРС.

В работе [96] при ремонте изношенных и производстве новых штампов, выполняющих разделительные операции в холодном состоянии, рекомендуется для повышения стойкости к усталостному разрушению наплавленного металла вводить в состав шихты порошковой проволоки оксид самария. Содержание оксида самария 4...6 мас. % способствует измельчению структуры наплавленного металла и высокому сопротивлению усталостному разрушению.

Самозащитные порошковые проволоки ИЭС им. Патона ПП-АН193 и ПП-АН204 обеспечивают получение наплавленного металла типа мартенситностареющих сталей, отличающихся высокой твердостью и износостойкостью при трении металла по металлу. Этими проволоками можно наплавлять без подогрева штампы и штамповую оснастку из инструментальных сталей 50ХНМ и 25Х5ФМС для горячего и холодного деформирования металлов [86]. Однако такие стали при достаточной износостойкости обладают невысоким запасом пластичности [79].

Для вырубных штампов применяются также стали с повышенной ударной вязкостью, такие как 7ХГ2ВМ, ХГ2М и др. [97]. Эти стали обладают высокой прочностью и ударной вязкостью. Однако наблюдается снижение их сопротивляемости смятию после полной термической обработки. В рекомендуемой авторами [98] стали Х2ГСВ2Ф ударная вязкость повышается после высокотемпературного отпуска. Однако высокое содержание углерода

0,9...1,1 % приводит к охрупчиванию стали. Повышение ударной вязкости наплавленного металла в пределах 260...290 кДж/м<sup>2</sup>, при сохранении твердости 55...57 HRC, возможно при снижении количества углерода до 0,75...0,9 % [84].

В стали с повышенной ударной вязкостью 7ХГ2ВФМ [99] повышение стойкости штампового инструмента достигается увеличением содержания марганца до 2 %, что приводит к увеличению содержания аустенита в стали.

Предприятием «ТМ.ВЕЛТЕК» для наплавки пуансонов и матриц холодной штамповки разработаны порошковые проволоки BeT ПП-Нп12Х13, BeT ПП-Нп12Х14НЗ с твердостью в 4 слое HRC 36...52 [100]. Металл наплавленный этими проволоками хорошо сопротивляется истиранию, возможна обработка металла резанием без смягчающей термообработки. Однако металл имеет удовлетворительное сопротивление ударам.

В целом характерным признаком сталей для холодной штамповки является содержание углерода более 0,6 %. Превышение углерода более 1,0...1,2 % приводит к снижению прочности, вследствие выделения карбидов по границе зерна [99]. Содержание хрома ограничивают в пределах 2...7 %. Больше его содержание приводит к увеличению склонности наплавленного металла к растрескиванию, а содержание менее 2 % не обеспечивает необходимой износостойкости в связи с отсутствием необходимого количества карбидной фазы [99].

Таким образом, из анализа литературных данных следует, что повышение стойкости штампового инструмента для холодной штамповки может быть достигнуто увеличением твердости и износостойкости наплавленного металла при оптимальной величине ударной вязкости, требуемой для штампов холодного деформирования.

## 1.6 Выбор и обоснование состава наплавленного металла

Правильный выбор материала для рабочих частей штампов и условий их термической обработки является одним из основных факторов, оказывающих влияние на стойкость штампов.

При выборе материала для штампа необходимо руководствоваться масштабом производства (массовое или серийное), характером штамповочной операции, размерами и формой штампуемой детали и свойствами материала, из которого изготавливается данная деталь. При прочих равных условиях при массовом производстве детали штампов должны изготавливаться из таких материалов, которые могли бы обеспечить максимальную производительность при высокой стойкости штампов [80].

Штамповые стали по химическому составу классифицируют на следующие группы: высокоуглеродистые, высокохромистые, низколегированные и комплекснолегированные.

Учитывая условия работы и стоимость сталей различных марок, идущих на изготовление пуансонов и матриц вырубных штампов, при выборе материала для них в условиях массового производства можно руководствоваться следующими данными.

При вырубке (пробивке, обрезке) деталей простой конфигурации из материала толщиной до 3...4 мм для пуансонов и матриц с успехом можно применять инструментальную углеродистую сталь марок У8А и У10А [78]. После термической обработки поверхность деталей из этих сталей может иметь твердость HRC 60...64 при пониженной твердости и высокой вязкости глубоких слоев металла. Однако углеродистые стали характеризуются низкой стойкостью, поэтому несмотря на доступность и невысокую стоимость, широкого применения в настоящее время они не находят.

Для вырубке деталей сложной конфигурации, а также при толщине материала свыше 4 мм рекомендуется применять инструментальную

легированную сталь марок X12, X12M, 9XBГ [78, 99], X12Ф1, 9XC, X6BФ [80], 12X13, 12X14H3 [100] при твердости после закалки HRC 36...56.

Высокохромистые стали обладают большой твердостью в закаленном состоянии, хорошей прокаливаемостью, малым короблением и отсутствием трещин при закалке, высокой износостойкостью. Однако значительная карбидная неоднородность ухудшает ударную вязкость этих сталей и стойкость штампов.

Приведенные углеродистые низколегированные стали при хорошей пластичности обладают низкой износостойкостью.

Для повышения стойкости инструмента разработан ряд комплекснолегированных штамповых сталей X2B2ФМ, X2ГCB2Ф, 8X3ГCB2Ф [79, 84], 7XГ2BФМ, XГ3BФМ, 8X4B3M3Ф2, 7X3ГCM [84, 99], 5X5M2BHФ [79], 6X8C2PT [91, 93].

На основании литературных данных [59, 79, 84, 93, 99, 100] и предварительных исследований при выборе состава наплавленного металла для сравнительной оценки выбраны штамповые стали марок: X12M, 12X14H3, X2B2ФМ, 8X3ГCB2Ф, 6X8C2PT, 7XГ2BФМ. Сравнительная оценка произведена по комплексу свойств: закаливаемости, теплостойкости, относительной износостойкости, ударной вязкости и стойкости наплавленных этими сталями штампов. Наплавленный металл, по условиям работы инструмента холодной штамповки, должен обладать повышенной твердостью (более 54 HRC) и соответственно хорошей закаливаемостью.

Комплексно легированные стали получают максимальную твердость при закалке в масле с температуры превышающей 900 °С. Твердость более 60 HRC сталь X2B2ФМ получает при закалке с температуры 790 °С, сталь 8X3ГCB2Ф при 800 °С, 7XГ2BФМ при 830 °С. Стали X12M, 12X14H3 и 6X8C2PT приобретают необходимую твердость только в результате закалки с температуры нагрева более 880...900 °С. Таким образом наиболее низкие температуры закалки у сталей X2B2ФМ и 8X3ГCB2Ф.

Теплостойкость определяется максимальной температурой отпуска,

при которой штамповая сталь еще сохраняет допустимую величину твердости 54 HRC. При исследованиях теплостойкости закалка образцов производилась в масле с оптимальной для каждой стали температуры нагрева. Установлено, что наиболее высокой теплостойкостью обладают стали X12M, X2B2ФМ и 8X3ГCB2Ф.

Для получения сравнительных данных по износостойкости различных сталей были проведены предварительные испытания образцов наплавленных этими сталями, при трении без смазки с постоянной скоростью скольжения 0,92 м/с и удельном давлении 2,5 МПа. Относительная износостойкость определялась, как отношение интенсивности изнашивания материала эталона к интенсивности изнашивания образца в одинаковых условиях. В качестве материала эталона принята сталь У8. Установлено (рис. 3.1), что в наименьшей мере склонны к истиранию при одинаковой твердости стали: X12M, 12X14H3, X2B2ФМ и 8X3ГCB2Ф.

Карбиды, являясь наиболее твердой фазой в сталях, повышают их сопротивление истиранию. При низком отпуске избыточные карбиды составляют основную часть карбидной фазы закаленных сталей. Повышенное содержание избыточных карбидов при отпуске, при равномерном их распределении в наплавленном металле, содержится в сталях X2B2ФМ и 8X3ГCB2Ф [84]. В сталях X12M и 12X14H3 также содержится повышенное количество карбидов, что и обуславливает их высокую износостойкость. Однако стали X12M и 12X14H3 обладают значительной карбидной неоднородностью.

Штамповая сталь в рабочем состоянии должна обладать достаточными пластическими свойствами. Последние можно характеризовать значениями ударной вязкости. Согласно данным испытаний (рис. 3.1) комплексно легированные стали 7ХГ2ВФМ и 8Х3ГCB2Ф обладают практически одинаковой ударной вязкостью. Меньшее значение ударной вязкости наплавленного металла X2B2ФМ объясняется более высоким содержанием в ней углерода. Низкое значение ударной вязкости наплавленного металла

6X8C2PT обусловлено наличием титана, за счет которого увеличивается количество нитридов в наплавке, а также наличием бора. Наименьшей ударной вязкостью обладают металлы X12M и 12X14H3, что обусловлено значительной карбидной неоднородностью.

Окончательная оценка стойкости металла наплавки выполнена производственными испытаниями однотипных штампов для холодной обрезки деталей из материала Ст. 3 толщиной 4 мм. Стойкость штампа определялась по количеству обрезанных деталей до полного износа режущих кромок. Наиболее высокую стойкость показали инструменты, наплавленные металлом типа 8X3ГCB2Ф. Высокую стойкость проявили также инструменты, наплавленные металлами типа X2B2ФM, 6X8C2PT.

На диаграмме (рис. 1.1) максимум стойкости наплавленных штампов сдвинут в сторону увеличения износостойкости сталей при трении. Этот максимум определяет оптимальную величину ударной вязкости, требуемой для штампов, выполняющих разделительные операции.

Таким образом, на основе проведенного анализа в наибольшей мере требованиям, предъявляемым к вырубным штампам, удовлетворяет сталь 8X3ГCB2Ф, которая и была взята за основу в дальнейших исследованиях.

Вместе с тем, во всех указанных случаях наплавки самозащитными порошковыми проволоками глубина проплавления оставалась такой, что требуемый состав металла достигался только в 3...4 слое. Уменьшить глубину проплавления, не снижая величины тока, а следовательно и число слоев наплавки возможно за счет повышения производительности плавления порошковой проволоки. Указанный эффект достигается за счет дополнительного тепловложения от экзотермической реакции.



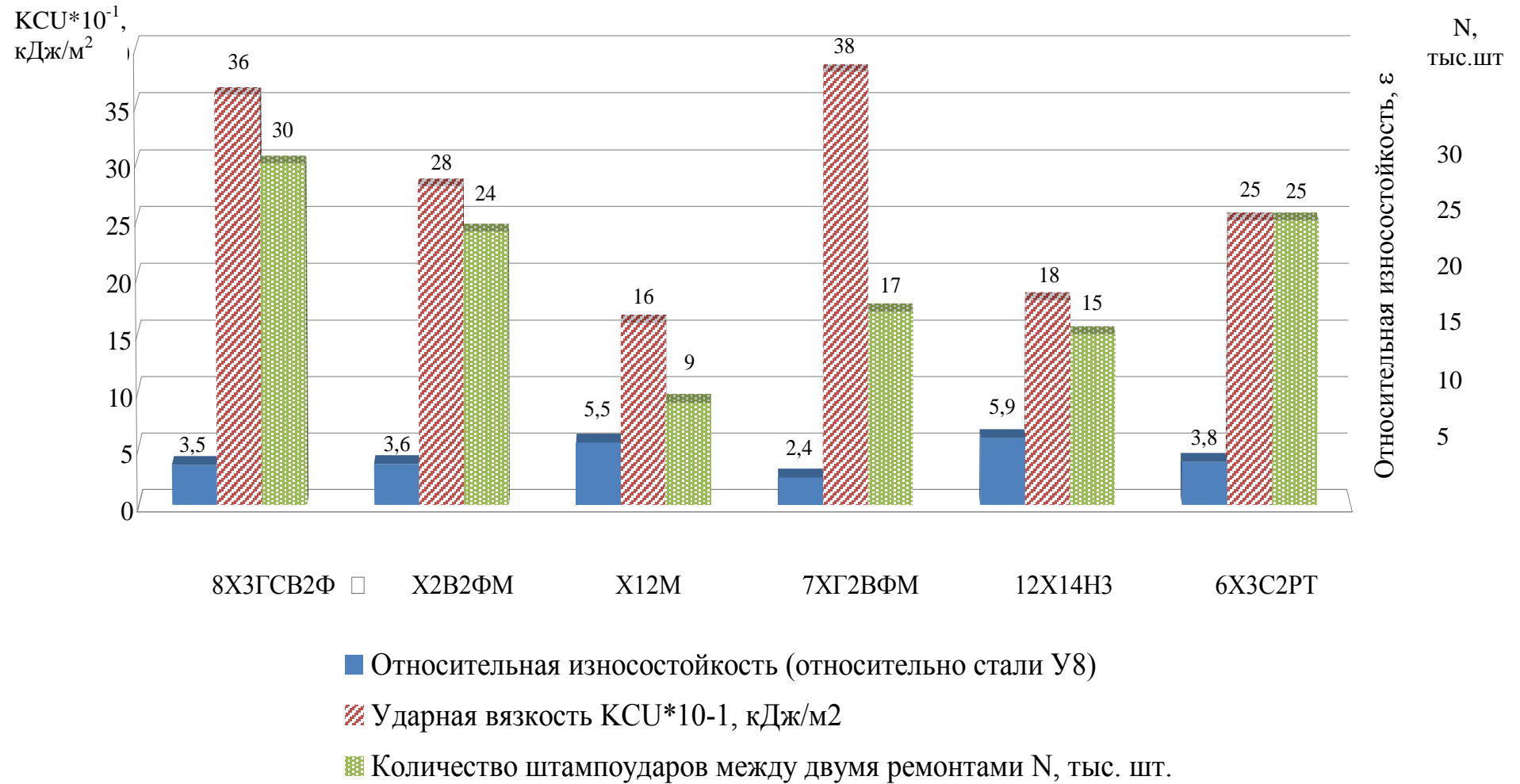


Рисунок 1.1 – Ударная вязкость, относительная износостойкость и стойкость штампов в зависимости от состава наплавленного металла

## Выводы и постановка задачи исследования

### Выводы:

1. Из анализа литературных данных установлено, что важным резервом улучшения характеристик плавления самозащитных порошковых проволок является введение в состав их шихты экзотермической смеси, что обеспечивает равномерность плавления сердечника и оболочки проволоки и улучшает качество наплавленного металла.

2. Состав экзотермической смеси и соотношение компонентов смеси, определяющих тепловой эффект экзотермической реакции, оказывают определяющее влияние на сварочно-технологические характеристики электродных материалов. В литературе отсутствуют данные об оптимальном соотношении компонентов смеси и их содержании в составе самозащитных порошковых проволок, при котором будет протекать управляемая экзотермическая реакция.

3. Разработку самозащитных порошковых проволок для наплавки легированных инструментальных сплавов целесообразно выполнять на основе наполнителя рутил - карбонатно - флюоритного типа.

4. Повышение стойкости штампового инструмента для холодной вырубки может быть достигнуто увеличением твердости и износостойкости наплавленного металла при оптимальной величине ударной вязкости, требуемой для штампов указанного назначения.

5. Качество наплавленного металла зависит от структуры, фазового состава, степени его загрязненности неметаллическими включениями, в том числе по причине неравномерности плавления самозащитных порошковых проволок, что возможно устранить дополнительным подогревом сердечника.

6. Анализ литературных данных и сравнительные испытания штамповых сталей показали, что наиболее высокую стойкость обеспечивают инструменты, наплавленные металлом типа 8ХЗГСВ2Ф, который и был взят за основу в дальнейших исследованиях.

В этой связи задача определения состава и соотношения компонентов экзотермической смеси, теплового эффекта экзотермической реакции, основных закономерностей влияния смеси на сварочно-технологические свойства самозащитной порошковой проволоки для наплавки и свойства наплавленного металла является актуальной проблемой.

Для выполнения поставленной проблемы необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить теоретические предпосылки применения и определить оптимальный состав и соотношение компонентов экзотермической смеси, обеспечивающий управляемую экзотермическую реакцию с тепловым эффектом достаточным для подогрева сердечника самозащитной порошковой проволоки.

2. Выбрать, усовершенствовать и разработать методики исследования сварочно-технологических свойств порошковой проволоки.

3. Исследовать влияние экзотермической смеси на характеристики плавления, размеры зоны проплавления при наплавке порошковой проволокой, химическую неоднородность наплавленного металла, физические и технологические свойства шлаков.

4. Разработать состав самозащитной экзотермической порошковой проволоки и технологию наплавки штампов холодного деформирования металла.

5. Исследовать влияние состава самозащитной порошковой проволоки на структуру и свойства наплавленного металла и температуру предварительного подогрева.

## РАЗДЕЛ 2

### ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЙ И МЕТОДИК ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные задачи исследований решались аналитическими и экспериментальными методами теории сварочных процессов, металловедения, металлургии, математического планирования эксперимента и статистической обработки результатов.

#### 2.1 Методики определения физических и технологических свойств шлаков

Температура плавления шлаков является одной из основных физических характеристик, определяющая их физико-химические свойства. Точно определить температуру плавления шлаков трудно, так как соответствующие критические точки превращения выражены не всегда отчетливо, а иногда и вовсе отсутствуют. Для шлаков характерно наличие некоторого интервала плавления, лежащего между температурами начала размягчения шлака и его перехода в жидкое состояние, отвечающее полному плавлению. Для определения температуры плавления шлака применялся метод, описанный в работе [101]. Температура плавления определялась как температура деформации крупинки шлаковой корки размером 0,5...0,7 мм при нагреве в высокотемпературном микроскопе типа АЛА - ТОО. Нагрев производили с постоянной скоростью, наблюдая за состоянием крупинки шлака.

Для измерения вязкости шлаков применяют методы вискозиметрии: капиллярного истечения, движущегося в жидкости тела, затухающих крутильных колебаний, вибрационный и ротационные методы [102 – 105].

Ротационный метод [102, 103], или, как его еще называют, метод коаксиальных (концентрических) цилиндров широко применяется в высокотемпературной вискозиметрии. Метод основан на законе течения жидкости, находящейся в зазоре между двумя соосными телами, причем одно из тел вращается, а другое неподвижно. Вязкость определяют по измеренному крутящему моменту при заданной угловой скорости или по угловой скорости при заданном крутящем моменте.

В данной работе измерение вязкости шлака производили на ротационном вискозиметре с вращающимся рабочим телом [103]. В электрическую нагревательную печь Таммана помещается молибденовый тигель с исследуемым шлаком. Нагрев осуществляется до температуры 1600 °С Температуру шлака фиксировали вольфрам - рениевой термопарой ВР 5/20, горячий спай которой был подведен ко дну тигля. После расплавления шлака в тигель на определенную глубину опускается цилиндр - головка шпинделя вискозиметра, закрепленный на стальной струне. Устанавливается нейтральное положение шпинделя, для этого стрелка вискозиметра устанавливается на нуле. Затем включается мотор, вращающий верхнюю часть вискозиметра. Вращение шпинделя начинается лишь тогда, когда крутящий момент струны станет равным моменту сил вязкого течения шлака. Фиксируется угол отставания стрелки, прикрепленной к шпинделю от нулевого деления шкалы, которая сочленена жестко с верхней вращающейся частью вискозиметра. Шкалу вискозиметра перед определением вязкости градуируют по эталонным жидкостям, вязкость которых точно известна. Произведя несколько замеров при данной температуре, определяют среднее значение.

Для определения поверхностного натяжения расплавленного шлака использовался метод максимального давления в газовом пузырьке, как наиболее простой, надежный и обеспечивающий достаточную точность измерений [106, 107]. Метод основан на зависимости между давлением газа в пузырьке и плотностью расплава при погружении капилляра на различную

глубину. Для выдувания пузырька через капилляр пропускали аргон, очищенный от примесей. Для измерения поверхностного натяжения шлак засыпали в молибденовый тигель, помещали в печь Таммана и нагревали до 1600 °С, создавая в печи нейтральную атмосферу. После выдержки при этой температуре в расплав погружали капилляр и проводили измерения давления, необходимого для отрыва пузырька на глубине 2 и 7 мм. Измерения проводили при понижении температуры от 1600 °С до 1400 °С через 40...50 °С.

Поверхностное натяжение шлаков рассчитывали по формуле [106]:

$$\sigma = \frac{(P - (\rho - \rho_g) \cdot g \cdot H) \cdot r}{2} \quad (2.1)$$

где  $P$  – максимальное давление в газовом пузырьке, Па;

$\rho$  – удельный вес исследуемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_g$  – удельный вес вдуваемого газа, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$r$  – радиус капилляра, м;

$H$  – глубина погружения капилляра в шлак, м.

Плотность шлаков рассчитывали по формуле:

$$\rho = \frac{(P_{max} - P_0) \cdot \kappa}{h \cdot \left(1 + \frac{r_n^2}{R^2 - r_n^2}\right)} \quad (2.2)$$

где  $\kappa$  – коэффициент, учитывающий угол наклона манометра,

$h$  – глубина погружения капилляра, м;

$r_n$  – наружный радиус капилляра, м;

$R$  – внутренний радиус тигля, м.

Для исследования строения шлаков подобрали часть шлаковой корки, исследуемая поверхность которой нивелировалась на мелкой наждачной

шкурке, а образовавшаяся на поверхности образца пыль удалялась выдуванием воздухом. Исследование строения шлаков в исходном состоянии и при нагреве проводились на высокотемпературной установке АЛА-ТОО. Нагрев образца осуществлялся на стальной подложке пропусканием через нее тока. Максимальная температура нагрева 1800 К, давление в рабочей камере  $6,6 \cdot 10^{-4}$  Па. Наблюдение велось через микроскоп при увеличении в 410 раз, что позволяло фиксировать фазовые превращения.

Идентификацию фаз проводили при помощи рентгеновского анализа с использованием камеры Дебая на рентгеновской установке УРС – 50ИМ. Трубка имела хромовый анод. Режим работы установки: ток 8 мА, напряжение 30 кВ. Дополнительно проводился масс-спектральный анализ шлаков с целью изучения его ионного состава. Методика исследований заключается в нанесении на ленточный источник ионов порошка шлака, замешанного на спирту, с последующим размещением его в масс-спектрометре. Принцип работы установки основан на разделении различающихся по массе и предварительно ионизированных методом термической эмиссии молекул. Разделение происходит в магнитном поле при наличии высокого вакуума. Методом масс-спектрометрии определяли массу и относительное содержание в анализируемом веществе компонентов, отличающихся по массе.

Кроющая способность шлака  $K_{к.с.}$  при наплавке самозащитной порошковой проволокой по методике [108] определялась величиной произведения частных от деления толщины шлаковой корки на вершине наплавленного валика  $\Delta_1$  к толщине шлаковой корки у основания наплавленного валика  $\Delta_2$  и площади поверхности наплавленного валика, покрытого шлаком,  $S_1$  к общей площади поверхности валика  $S_2$ , т.е.:

$$K_{к.с.} = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad (2.3)$$

От отделимости шлаковой корки в значительной мере зависит производительность многослойной наплавки. Методы прямого экспериментального определения отделимости шлаковой корки делятся на качественный (балльно – ранговый) и количественные методы [109]. Определение отделимости на качественном уровне [110 – 112] предпочтительно для производства, так как не требует много времени и средств, однако ему свойственна субъективная оценка.

Методы количественной оценки отделимости основаны на определении угла изгиба [113] или силы удара, приложенной к образцу [109, 114, 115]. В данной работе для оценки отделимости шлака использована методика, приведенная в работе [115].

Сущность данного способа заключается в том, что на поверхность пластины производится наплавка первого валика. После наплавки его освобождают от шлака и производят наплавку второго валика с перекрытием первого на половину его ширины. Пластина с наплавкой помещалась в быстродействующие зажимы маятникового копра, когда температура наплавленного металла была выше  $450^{\circ}\text{C}$ , и по обратной наплавленному слою стороне пластины выполнялся удар бойком. Угол подъема маятника сохранялся во всех опытах постоянным и равным  $60^{\circ}$ . Величина ударной нагрузки выбирается такой, при которой не происходит пластическое деформирование образца. Оценку отделимости шлакового покрытия производят по площади отделившегося шлака.

Наплавка производилась на пластину из низкоуглеродистой стали ВСт3пс размером  $12 \times 60 \times 250\text{мм}$ . Нагрузку задают распределенной по линии контакта бойка ударного механизма не менее чем на  $0,75$  длины образца для обеспечения равномерного распределения удара.

Оценку отделимости проводят по формуле

$$K = \frac{F}{E}, \quad (2.4)$$



где  $F$  – площадь образца, освобожденная от шлаковой корки,  $\text{м}^2$ ;

$E$  – энергия ударной нагрузки, которая может быть рассчитана как произведение веса груза и высоты его падения,  $\text{Н}\cdot\text{м}$ .

Установка для оценки отделимости шлаковой корки представляет собой маятниковый копер с известной массой бойка. Наплавленный образец устанавливается в предполагаемую нижнюю точку падения бойка. После удара образец вынимается из установки и определяется площадь отделившегося шлака.

## 2.2 Методики определения сварочно-технологических характеристик порошковых проволок

Изготовление самозащитной порошковой проволоки трубчатого сечения для экспериментального исследования производили на специальном волочильном однобарабанном стане лаборатории кафедры ОиТСП ДГМА (рис. 2.1).

При изготовлении СПП в качестве оболочки применялась холоднокатаная стальная лента марки 08кп шириной 20 мм и толщиной 0,5 мм (ГОСТ503-81).

Процесс волочения осуществляли следующим образом: холоднокатаную стальную ленту шириной 20 мм подавали в профелегибочное устройство с одновременным дозированием шихты через дозатор и последующим деформированием ленты формирующей волокой в исходную трубчатую заготовку диаметром 5,9 мм. Далее осуществляли поэтапную протяжку проволоки через волоки диаметром 5,77 мм, 5,6 мм, 5,45 мм, 5,15 мм, 4,9 мм, 4,6 мм, 4,35 мм, 4,18 мм, 4 мм. Окончательный диаметр порошковой проволоки 4 мм.



Рисунок 2.1 – Волочильный однобарабанный стан

Для определения влияния эффекта экзотермического процесса, возникающего при плавлении самозащитной порошковой проволоки с экзотермической смесью в шихте сердечника, на сварочно-технологические свойства порошковой проволоки были изготовлены самозащитные порошковые проволоки со шлакообразующей основой рутил - флюорит - карбонатного типа с различным содержанием экзотермической добавки, представляющей собой механическую смесь окалины и алюминия.

Легирующая часть шихты каждого наполнителя рассчитывалась на получение наплавленного металла типа 8ХЗГСВ2Ф. Коэффициент заполнения порошковой проволоки составлял 0,36...0,38.

Важной сварочно-технологической характеристикой порошковой проволоки является производительность процесса расплавления, которая оценивается количеством расплавленного металла в единицу времени. Производительность процесса расплавления пропорциональна величине сварочного тока [6, 116].

$$G_p = \alpha_p I_{св}, \quad (2.5)$$

где  $\alpha_p$  – коэффициент расплавления, г/ А·ч;

$I_{св}$  – сила сварочного тока, А.

Коэффициент расплавления  $\alpha_p$  СПП без экзотермической смеси описывается выражением

$$\alpha_p = \frac{m_{np} (1 - \kappa_3 \cdot Q_{гш}) \cdot 3600}{I_{св} \cdot t}, \quad (2.6)$$

где  $m_{np}$  – масса расплавленной порошковой проволоки, г;

$\kappa_3$  – коэффициент заполнения порошковой проволоки;

$Q_{гш}$  – относительное количество газшлакообразующих в составе шихты СПП;

$t$  – время наплавки, с.

При наплавке СПП с экзотермической смесью протекает металлургический процесс, связанный с восстановлением железа из окалины. В связи с этим необходимо учесть количество окалины в составе шихты порошковой проволоки. Тогда выражение (2.6) принимает следующий вид:

$$\alpha_p = \frac{m_{np} [1 - \kappa_3 \cdot (Q_{гш} + Q_{ок} \cdot \kappa_{ш})] \cdot 3600}{I_{св} \cdot t}, \quad (2.7)$$

где  $Q_{ок}$  – относительное количество окалины в составе шихты СПП;

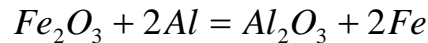
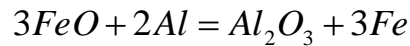
$\kappa_{ш}$  – потери на шлакообразование и угар в результате протекания экзотермической реакции.

Определение количества восстановленного при протекании экзотермической реакции железа проводили по следующей методике. В качестве экзотермической смеси используется смесь алюминиевого порошка и окалины, состоящей из оксидов железа  $Fe_2O_3$  (35%) и  $FeO$  (65%).

При содержании экзотермической смеси окалина-алюминий, в

соотношении 4:1, в составе шихты СПП 40 масс. %, содержание  $Fe_2O_3$  составляет 11,2 масс. %, содержание  $FeO$  20,8 масс. %.

Взаимодействие алюминия с оксидами железа протекает по реакциям:



Количество восстановленного  $Fe$  в результате протекания экзотермических реакций определяется из соотношения:

$$\frac{M_{ок}}{M_{Fe}} = \frac{Q_{ок}}{Q_{Fe}} \quad (2.8)$$

где  $M_{ок}$  – молярная масса оксида железа, моль;

$M_{Fe}$  – молярная масса железа, моль;

$Q_{Fe}$  – количество восстановленного железа, масс. %;

$Q_{ок}$  – количество оксида железа в составе шихты СПП, масс. %;

Тогда для реакции алюминия с  $Fe_2O_3$  количество восстановленного железа  $Q_{Fe}$  составляет 7,8 масс. %, а для реакции алюминия с  $FeO$  это количество составляет 16,2 масс. %, суммарное количество восстановленного железа составляет 24 масс. %.

Анализ полученных данных показывает, что в результате протекания экзотермической реакции, при плавлении СПП из окалины восстанавливается 75 % железа. Следовательно, потери на шлакообразование и угар составляют 25 %, таким образом  $k_{ш} = 0,25$ .

Удельная производительность процесса наплавки оценивается коэффициентом наплавки  $\alpha_n$ :

$$\alpha_n = \frac{m_n \cdot 3600}{I_{св} \cdot t}, \quad (2.9)$$

где  $m_n$  – масса наплавленного металла, г;

Потери электродного металла в процессе наплавки оцениваются коэффициентом потерь  $\Psi$ :

$$\psi = \frac{G_p - G_n}{G_p} 100\% \quad (2.10)$$

Однопроходная наплавка валиков на пластины из низкоуглеродистой стали ВСтЗпс размером 10×100×200 мм выполнялась на сварочном автомате А-874 на режиме  $I_{CB} = 380 \dots 400$  А,  $U_D = 29 \dots 30$  В,  $V_{CB} = 19,3$  м/ч.

### 2.3 Методики определения эффекта экзотермической реакции

При выборе состава экзотермической смеси производится оценка теплового эффекта взаимодействия элемента - раскислителя с окислителем.

В общем виде реакция экзотермического процесса может быть выражена следующим уравнением [42]:



где Me – активный металл;

$M_k O_m$  – элемент окислитель;

M – восстановленный металл;

m, n, k – количество атомов.

Интенсивное протекание металлотермической реакции будет наблюдаться только в том случае, когда выделяющееся тепло способно значительно повысить температуру начала реакции и превысить

критическую температуру начала реакции [42].

Тепловой эффект на 1 грамм экзотермической смеси составит [2, 10, 26]

$$q = \frac{\Delta H_{298}^0}{M}, \text{кДж/г} \quad (2.11)$$

где  $\Delta H_{298}^0$  – энтальпия металла в нормальных условиях, кДж/моль;

$M$  – сумма молекулярных масс исходных веществ, г/моль.

В работе при выборе составляющих экзотермической смеси произведена оценка тепловых эффектов взаимодействия различных элементов - раскислителей с различными окислителями.

Дополнительное тепло экзотермической реакции ускоряет плавление сердечника и повышает равномерность плавления порошковой проволоки [22, 117].

Для оценки равномерности плавления порошковой проволоки предложена методика [5], которая заключается в том, что за оценку равномерности плавления принимается длина выступа неоплавившейся части сердечника, которая осталась на торце электрода, после угасания дугового разряда. Однако недостатком данной методики является то, что при плавлении порошковой проволоки не фиксируется величина ее вылета, а также не учитывается внутренний диаметр проволоки, который влияет на содержание компонентов шихты сердечника и температуру его нагрева.

В данной работе оценку равномерности плавления самозащитной порошковой проволоки производили методом [118], который позволяет с высокой точностью оценить равномерность плавления порошковой проволоки. Для этого проводится наплавка на поверхность подготовленного образца с фиксированной величиной вылета. После затухания дугового разряда измеряют внутренний и внешний диаметр проволоки и длину выступа сердечника, а оценку равномерности плавления выполняют по формуле:

$$A = \left( \frac{l}{d} \cdot \frac{L}{D} \right)^{-1}, \quad (2.12)$$

где  $l$  – длина выступа сердечника порошковой проволоки после угасания дугового разряда, мм;

$d$  – внутренний диаметр порошковой проволоки, мм;

$L$  – величина вылета проволоки, мм;

$D$  – внешний диаметр проволоки, мм.

Фиксирование длины вылета проволоки и ее диаметра, при выполнении наплавки, гарантирует идентичные условия протекания процесса плавления порошковых проволок с разными шлаковыми системами, что положительно влияет на точность оценки. Применение в методике оценки равномерности плавления величины внутреннего диаметра порошковой проволоки позволяет учитывать условия подвода тепла к частицам порошкообразного наполнителя.

Для оценки химической неоднородности металла наплавки производилось определение равномерности распределения хрома по толщине наплавки. Определение содержания хрома выполнялось на рентгеноспектральном микроанализаторе фирмы САМЕСА. Электронно-зондовый микроанализатор SXFiveFE обеспечивает точное качественное и количественное измерение и визуализацию распределения элементного состава по поверхности. Рентгеноспектральный микроанализ – методика, позволяющая с помощью электронного микроскопа или специального электронно-зондового микроанализатора получить информацию о химическом составе образца в произвольно выбранном участке микроскопических размеров.

Количественный рентгеноспектральный микроанализ – это относительный метод, основанный на сравнении измеренной интенсивности рентгеновских линий, генерируемых в образце с интенсивностями соответствующих линий в эталоне известного состава. Содержание элемента

рассчитывается из отношения интенсивностей рентгеновских линий на образце и эталоне с известной концентрацией определяемого элемента в последнем.

Для определения содержания хрома по толщине наплавки, в зоне сплавления и основном металле производилась четырехслойная наплавка самозащитной порошковой проволокой, содержащей экзотермическую смесь и проволокой, в которой вместо экзотермической смеси использована смесь порошков железа и алюминия.

Классическим показателем однородности значений какого либо параметра является отношение случайных отклонений этого параметра к его среднему значению. Данный показатель позволяет сравнить характеристики рассеивания параметров, имеющих не только разные средние значения, но и различные единицы измерения.

Характеристики рассеяния – среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  и коэффициент вариации  $K_v$ , вычисляются по формулам [119]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M)^2}{n-1}} ; \quad (2.13)$$

$$K_v = \frac{\sigma}{M} * 100\% \quad (2.14)$$

где:  $x_i$  – значение параметров в  $i$ -й момент времени;

$M$  – среднее значение параметра;

$n$  – число изменений.

Среднеквадратичное отклонение выражается в тех же единицах, что и искомый параметр, а  $K_v$  – в %. При анализе параметров сварки пользоваться среднеквадратичным отклонением затруднительно, так как этот показатель взятый отдельно от среднего значения параметра теряет смысл. Поэтому в данной работе используется коэффициент вариации, включающий в себя как среднеквадратичное отклонение так и среднее значение параметра.



## 2.4 Методика интегрального измерения сварочного тока

Для оценки влияния экзотермической смеси в шихте на характеристики плавления порошковой проволоки выполнялись интегральные измерения сварочного тока на достаточно протяженном временном интервале. Интегральные измерения сварочного тока выполнялись на стенде, представленном на рис. 2.2.

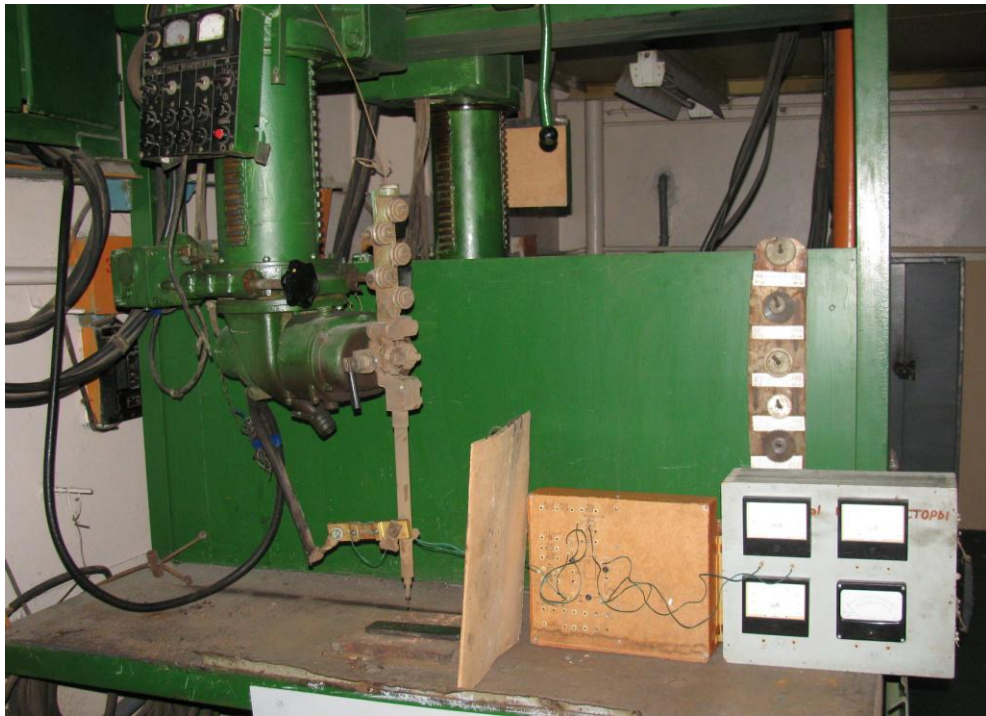


Рисунок 2.2 – Экспериментальный стенд

Схема выполнения измерений приведена на рис. 2.3 [120]. Схема содержит интегратор на операционном усилителе D1, компаратор (элемент сравнения) на операционном усилителе D2 (усилитель КР140УД2А), таймер H, для отсчета интервалов времени. В качестве датчика тока использовался измерительный шунт RS, включенный последовательно в сварочную цепь.

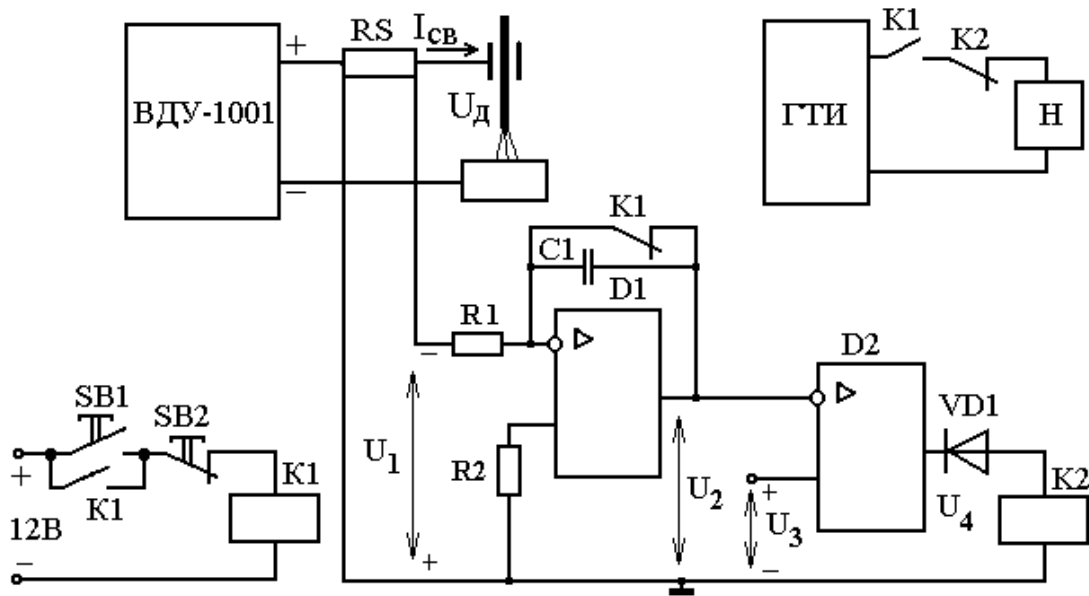


Рисунок 2.3 – Схема выполнения измерений

Сигнал с шунта  $U_1 = I_{CB}R_{ш}$  подается на вход интегратора D1. Процесс измерения включается после установления стабильного процесса наплавки путем замыкания кнопки SB1. При этом срабатывает реле K1, которое размыкающим контактом запускает процесс интегрирования, а замыкающим контактом – включает таймер H.

На выходе интегратора получаем:

$$U_2 = \frac{-1}{R_1 C_1} \int_0^t U_1 dt = \frac{-1}{R_1 C_1} \int_0^t I_{CB} R_{ш} dt \quad (2.15)$$

В схеме измерений установлено  $R_1 = 1000 \text{ Ом}$ ,  $C_1 = 1000 \text{ мкФ}$  и измерительный шунт ШСМ-500,  $R_{ш} = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ , тогда:

$$U_2 = \frac{-R_{ш}}{R_1 C_1} \int_0^t I_{CB} dt = \frac{-0,15 \cdot 10^{-3}}{1000 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}} \int_0^t I_{CB} dt = -0,15 \cdot 10^{-3} \int_0^t I_{CB} dt \quad (2.16)$$

Напряжение с выхода интегратора подается на компаратор D2, где

сравнивается с опорным напряжением  $U_3$ . Компаратор переключается при выполнении равенства:

$$-U_2 = U_3 \quad (2.17)$$

При этом срабатывает реле К2 и отключается таймер Н.

Среднее значение сварочного тока определяется из соотношения:

$$\int_0^t I_{CB} dt = I_{CB.CP} \cdot t \quad (2.18)$$

С учетом (2.15) и (2.16) получаем:

$$I_{CB.CP} = \frac{10^3 U_3}{0,15t}$$

Заданное напряжение  $U_3$  выбирается по оптимальному времени усреднения сварочного тока.

## 2.5 Методика оценки качества формирования наплавленного металла

Известен способ оценки качества формирования наплавленного металла, который заключается в том, что после наплавки одиночных валиков на поверхность подготовленного образца, выполняют замеры их ширины и высоты, а за оценку принимается соотношение ширины и высоты наплавленного валика [121].

Разработанная методика позволяет с большей точностью оценить качество формирования наплавленного металла. Способ оценки заключается

в наплавке одиночных валиков на поверхность подготовленного образца, последующем замере ширины, высоты и глубины проплавления валика, определения их соотношения, а оценку качества формирования наплавленного металла рассчитывают по формуле:

$$K_v = \frac{A \cdot B}{H^2}, \quad (2.19)$$

где  $A$  – высота наплавленного валика, мм;

$B$  – ширина валика, мм;

$H$  – глубина проплавления образца, мм.

Обязательным условием качественного формирования наплавленной части валика является выполнение зависимости  $B > 3A$ .

Глубина проплавления должна иметь минимально возможную величину, достаточную для обеспечения качественного соединения на границе образования биметаллического тела. То есть, глубина проплавления  $H$  должна удовлетворять условию  $H \neq 0$ .

Относительная оценка качества формирования наплавленного металла принимает оптимальное значение при  $K_v \geq 3$ .

Применение способа позволяет получить относительную количественную оценку качества формирования наплавленного металла при сравнении технологических свойств наплавленного металла и электродных материалов.

## 2.6 Металлографические методы исследования наплавленного металла

Задачей металлографического исследования является установление взаимосвязи между качественными и количественными характеристиками

структуры, и физическими, механическими, химическими, технологическими и эксплуатационными свойствами металлических материалов. Металлографические методы исследования металлов и сварных соединений позволяют определить размеры, форму и взаимное расположение кристаллов, а также неметаллические включения, трещины, поры, раковины и т. д. Различают макроскопический и микроскопический методы изучения строения металлов [122 – 125].

Макроанализ заключается в определении строения наплавленного металла и зоны термического влияния путем просмотра специально подготовленной поверхности невооруженным глазом или через лупу при небольших увеличениях – до 30 раз. Для увеличения использовалась лупа ЛП-3-12,5х ГОСТ 25706-83, обеспечивающая увеличение  $12,5 \div 11,9$  крат.

Макроанализ позволяет выбрать участки требующие дальнейшего микроскопического исследования. Макроанализ дает возможность выявлять трещины, шлаковые включения, поры и другие дефекты наплавленного металла, химическую и структурную неоднородность. Определение трещин, пор, а также шлаковых включений производится в соответствии с ДСТУ 3491-96.

Микроскопический анализ металлов заключается в исследовании их структуры с помощью оптического или электронного микроскопов на специально подготовленных образцах. Методами микроанализа определяют: форму и размеры кристаллических зерен, обнаруживают изменения внутреннего строения сплава под влиянием термической обработки или механического воздействия на сплав, микротрещины; исследования типа, количества и размеров неметаллических включений и многое другое [123, 124]. Микроанализ позволяет характеризовать размеры и расположение различных фаз, присутствующих в сплавах, если размеры частиц этих фаз не менее 0,2 мкм.

Этапы металлографического исследования [123]:

1. Приготовление микрошлифов. Вырезка образца, получение плоской поверхности, шлифование плоскости, полирование, промывка.

2. Изучение микроструктуры шлифа в нетравленном виде, то есть после полирования и промывки. В этом случае в поле зрения микроскопа можно заметить отдельные, обычно небольшие, темные участки, которые могут представлять неметаллические включения, мелкие поры, структурные составляющие.

3. Макро- и микроанализ позволяет выявить дефекты наплавленного металла: непровары, трещины, поры, шлаковые включения, а также устанавливает структуру металла.

Образец для металлографического исследования вырезают из наплавки поперек оси наплавки. Образец должен включать в себя как наплавленный валик, так и зону термического влияния.

Микроструктурный анализ наплавленного металла для выявления неметаллических включений выполняется на нетравленных шлифах. Поверхность, которую необходимо исследовать, тщательно обрабатывают под плоскость на металлорежущем станке. Затем поверхность отшлифовывают на плоско-шлифовальном станке в 5...6 проходов на наждачной бумаге различной шероховатости от P100 до P2000 в соответствии со стандартом FEPA ISO 6344. После этого производится финишное полирование алмазными пастами типа АСН 20/14 ПОМГ и АСН 7/5 ПОМТ по ДСТУ 3292-95 на бумаге, и фетре с водным раствором 5% оксида хрома. Подготовленная поверхность шлифа обезжиривается ватным тампоном, смоченным этиловым спиртом. На нетравленном шлифе видны трещины, поры, неметаллические включения.

Анализ неметаллических включений в наплавленном металле проводился в соответствии с ГОСТ1778-70 по методу П, обеспечивающим оценку количества включений определенных размеров на нетравленных шлифах, на микроскопе МИМ-8М при увеличениях  $\times 100$  и  $\times 300$ .

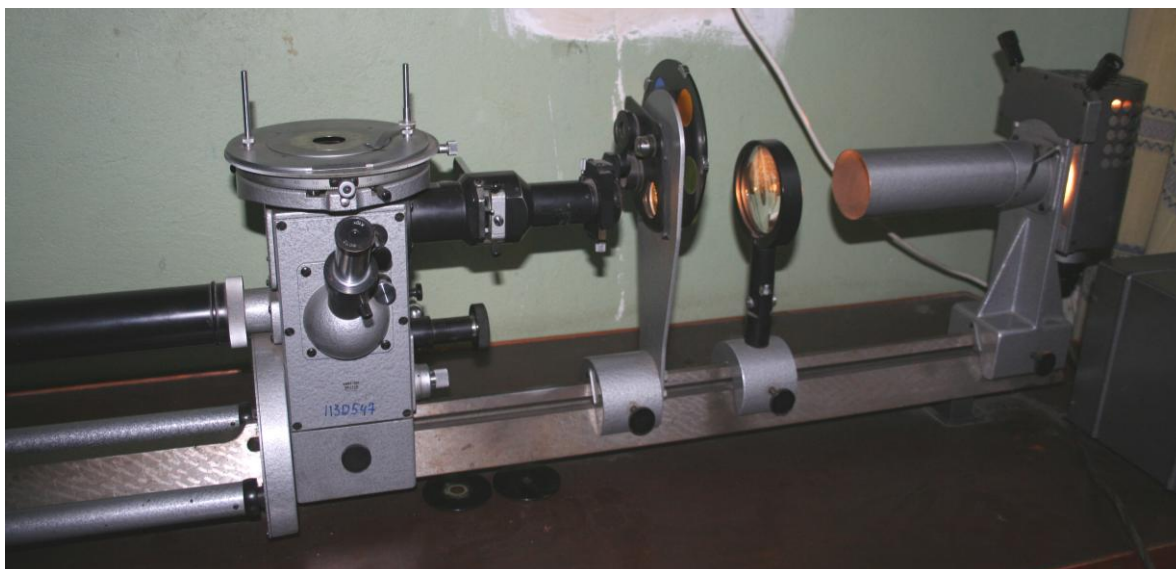


Рисунок 2.4 – Микроскоп металлографический горизонтальный МММ-8М, 100-1350х.

Определение химического состава наплавленного металла производили с помощью оптико-эмиссионного анализатора химического состава РМІ-MASTER PRO, который позволяет проводить точный экспресс-анализ состава сплавов, определяет массовые доли химических элементов в металлах и сплавах, в том числе легких элементов: углерода, серы, фосфора.

Принцип действия спектрометра основан на методе эмиссионного оптического спектрального анализа с возбуждением пробы с помощью дуги или искры. Объект исследования в процессе проведения анализа подвергается световому излучению: аргон обтекает исследуемый объект, делая его более заметным для излучения. Эмиссионный спектрометр фиксирует интенсивность излучения и на основе полученных данных анализирует состав металла. В режиме «дуга» производятся быстрые количественные анализы по идентификации и сортировке металла по марке стали. В режиме "искра" проводится полноценный количественный анализ металлов в среде аргона и измеряются все легирующие элементы, включая С, S, P.

Для выявления структуры наплавленного металла шлифы подвергают травлению. В процессе травления кристаллы растворяются с различной скоростью, так как они по-разному ориентированы относительно исследуемой поверхности. Свойства же кристаллов, в том числе и растворимость в химических реактивах, разные в разных направлениях. Границы между кристаллами содержат повышенный процент примесей, поэтому они растворяются быстрее кристаллов. В результате травления можно получить четкую картину кристаллического строения металла. Для травления микроструктуры применяют 4 % раствор азотной кислоты в спирте. Исследования и фотографирование микроструктуры проводят с помощью металлографического микроскопа МИМ-8М.

Определение содержания карбидной фазы производили в соответствии с методикой [116, 126]. Выполнялась многослойная наплавка на пластины из стали 45 размером 10×100×200 мм на режиме  $I_{СВ} = 380...400$  А,  $U_{д} = 29...30$  В,  $V_{СВ} = 19,3$  м/ч, из которой вырезали образцы диаметром 12 мм и длиной 60 мм после отжига при температуре 820...840 °С с выдержкой 2 часа и последующем охлаждении с печью. После этого образцы подвергались закалке в масло с температуры 900...950 °С.

Количество карбидной фазы определялось по их анодному осадку, который получен в результате электролитического растворения образцов наплавленного металла. Расчет содержания карбидной фазы производили по отношению к массе растворенного образца.

Исследования структуры производили также с использованием системы анализа изображений макро - и микроструктуры материалов SIAMS 700 на базе управляющей программы SIAMS Photolab, реализующей современные технологии автоматизированного анализа цифровых изображений микроструктуры металлов и сплавов.

Комплекс обеспечивает определение количественных характеристик и микроструктур материалов, получение цифровых изображений из различных источников, проведение измерений и оценку параметров изображений,



статистический анализ и отчеты по результатам исследования, формирование атласов цифровых изображений и протоколов исследований материалов.

Анализатор SIAMS 700 содержит готовые специализированные решения автоматизированного анализа изображений для типовых задач материаловедения: анализ зерна в сталях и сплавах, анализ структурных и фазовых составляющих стали, анализ неметаллических включений в стали, фазовый анализ, металлографический анализ методом сравнения с эталонами и др. [127].



Рисунок 2.5 – Система анализа изображений макро - и микроструктуры материалов SIAMS 700

## Выводы по разделу 2

1. Для решения поставленных задач, на основе литературного обзора, определены методики проведения теоретических и экспериментальных исследований по изучению физических и технологических свойств шлаков,

структуры и свойств наплавленного металла, сварочно-технологических свойств разрабатываемой самозащитной порошковой проволоки.

2. Разработаны новые методики интегрального измерения сварочного тока и оценки качества формирования наплавленного валика, усовершенствована методика определения сварочно-технологических характеристик порошковых проволок, позволяющие произвести количественную оценку и дающие высокую достоверность результатов исследований сварочно-технологических свойств разрабатываемой самозащитной порошковой проволоки и свойств наплавленного металла.

### РАЗДЕЛ 3

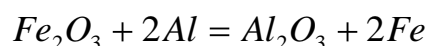
## ВЛИЯНИЕ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСИ НА ПРОЦЕСС ПЛАВЛЕНИЯ САМОЗАЩИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ

### 3.1 Эффективность тепловыделения при наплавке порошковой проволокой с экзотермической смесью

Важным резервом улучшения характеристик плавления самозащитных порошковых проволок является введение в состав их шихты экзотермических смесей [1, 2, 128]. Тепловой эффект экзотермических реакций дополняет тепло сварочной дуги и увеличивает скорость плавления и удельное количество расплавленного присадочного металла. В результате этого экзотермические смеси получили широкое применение в ряде областей техники в качестве источника эффективного воздействия на технологические процессы.

В процессе выбора состава экзотермической смеси для применения в исследованиях была произведена оценка тепловых эффектов взаимодействия различных элементов - раскислителей с различными окислителями. В качестве раскислителей применялись Al, Ti, B, Si, Ce, Hf, Ta. В качестве окислителей исследованы оксиды Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, NiO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MnO.

Оценку тепловых эффектов взаимодействия элемента - раскислителя с окислителем рассмотрим для реакции алюминия с оксидом железа [1, 24, 42, 43]



Тепловой эффект от 1г этой экзотермической смеси составит

$$q^{Al} = \frac{\Delta H_{298}^{Al}}{M} \quad (3.1)$$

где  $\Delta H_{298}^{Al}$  – энтальпия системы в нормальных условиях, кДж/моль;

$M$  – сумма молекулярных масс исходных веществ, г/моль.

$$q^{Al} = \frac{848,5}{213,64} = 3,97 \text{ кДж/г.}$$

Аналогичным образом рассчитывались тепловые эффекты на 1 г экзотермической смеси для реакций выше указанных элементов раскислителей с одним из окислителей (в данном случае  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Расчеты показали, что наибольший тепловой эффект достигается при использовании Al ( $q^{Al}=3,97$ кДж/г), затем Si (2,684 кДж/г), Ti (2,536 кДж/г), В (2,467 кДж/г), Се (2,26 кДж/г), Hf (1,994 кДж/г), Та (1,063 кДж/г). Таким образом, по тепловыделению наиболее целесообразным является использование в качестве раскислителя алюминия.

Затем была произведена оценка тепловых эффектов взаимодействия различных окислителей с Al. Расчеты показали, что наибольший тепловой эффект от 1г экзотермической смеси достигается при использовании CuO (4,2 кДж/г), затем  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (3,97 кДж/г), NiO (3,43 кДж/г), FeO (3,268 кДж/г),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ (2,64 кДж/г), MnO(1,94 кДж/г). Использование в экзотермической реакции в качестве окислителя оксида железа, приводит к восстановлению железа и повышению производительности наплавки.

В работе [129] произведен анализ взаимодействия трех наиболее распространенных типов оксидов железа с алюминием, из которого следует:

- для протекания экзотермической реакции с оксидом железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  требуется наибольшее количество алюминия, а при взаимодействии с оксидом FeO – наименьшее;

- наибольшее количество железа восстанавливается при использовании

FeO, а наименьшее - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;

- наибольшее количество тепла выделяется при взаимодействии алюминия с Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а наименьшее – FeO;

- промежуточное положение по количеству восстановленного железа и выделяемого тепла занимает реакция алюминия с Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

Применительно к наплавке нежелателен перегрев наплавленного металла, поэтому целесообразным является применение в шихте порошковых проволок экзотермической смеси на основе окалины, состоящей из смеси всех оксидов железа [1, 24, 129]. Температура начала такой экзотермической реакции находится в пределах 950...1000 °С [24].

Таким образом, на основе термодинамических расчетов и литературных данных в качестве составляющих экзотермической смеси выбрали окалину и алюминиевый порошок, которые и будут использоваться в дальнейших исследованиях.

Интенсивное протекание экзотермической реакции наблюдается только в случае, когда выделяющееся тепло способно значительно повысить температуру начала реакции и превысить критическую температуру начала реакции [42]. Согласно данным работы теплота выделяющаяся в результате реакции оксида железа с алюминием достаточна, чтобы в дальнейшем превысить критическую температуру 600 °С для данной реакции, и обеспечить нормальное ее течение.

Тепловая мощность экзотермической реакции  $Q_{э.с}$ , определяется по формуле:

$$Q_{э.с} = K_3 \cdot K_{э.с} \cdot q_{э.с} \cdot V_{п} \cdot \gamma_c \cdot F_c, \quad (3.2)$$

где  $K_3$  – коэффициент заполнения самозащитной порошковой проволоки;

$q_{э.с}$  – тепловой эффект от 1г экзотермической смеси, Дж/кг;

$V_{п}$  – скорость подачи проволоки, м/с;

$\gamma_c$  – плотность экзотермической смеси, кг/м<sup>3</sup>;

$F_c$  – площадь поперечного сечения сердечника самозащитной порошковой проволоки, м<sup>2</sup>;

$K_{э.с.}$  – коэффициент массы экзотермической смеси, определяемый как

$$K_{э.с.} = \frac{m_{э.с.}}{m_{ш}}$$

$m_{э.с.}$  – масса экзотермической смеси в шихте сердечника;

$m_{ш}$  – полная масса шихты сердечника такой же длины, что и при измерении  $m_{э.с.}$ .

Нагрев самозащитной порошковой проволоки осуществляется теплом, выделяемым током, проходящим через оболочку проволоки и теплом экзотермической реакции. Выделяемое тепло расходуется на нагрев оболочки проволоки, сердечника проволоки, а также теряется на нагрев окружающей среды. Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$K_z \cdot K_{э.с.} \cdot q_{э.с.} \cdot V_n \cdot \gamma \cdot F_c + \rho \cdot I_{св}^2 \frac{4 \cdot V_n}{\pi (d_{ш}^2 - d_c^2)} = V_n \gamma^M \frac{\pi (d_{ш}^2 - d_c^2)}{4} \Delta T^M + V_n \gamma^c \frac{\pi d_c^2}{4} \Delta T^c + V_n \alpha (T^M - T_o) \pi d_{ш} \quad (3.3)$$

где  $C^M$  и  $C^c$  – удельные теплоемкости соответственно оболочки и сердечника самозащитной порошковой проволоки, Дж/(кг·°С);

$\gamma^M$  и  $\gamma^c$  – плотности соответственно оболочки и шихты сердечника самозащитной порошковой проволоки, кг/м<sup>3</sup>;

$d_{ш}$  – диаметр самозащитной порошковой проволоки, м;

$d_c$  – внутренний диаметр самозащитной порошковой проволоки, м;

$\Delta T^M$  – изменение температуры металла, °С;

$\Delta T^c$  – изменение температуры сердечника, °С;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду, Дж/(м<sup>2</sup>·°С);

$T^M$  – температура нагрева оболочки, °С;

$T_0$  – начальная температура оболочки, °С;

$\rho$  – удельное электросопротивление оболочки, Ом·м;

$I_{св}$  – сварочный ток, А.

Из этого уравнения можно определить величину изменения температуры сердечника:

$$\Delta T^c = \frac{K_3 \cdot K_{э.с} \cdot q_{э.с} \cdot \gamma \cdot F_c + \rho \cdot I_{св}^2 \frac{4 \cdot t}{\pi (d_{nn}^2 - d_c^2)} \left( \epsilon \gamma \right)^m \frac{\pi (d_{nn}^2 - d_c^2)}{4} \Delta T^M - \alpha (T^M - T_0) \pi d_{nn}}{\left( \epsilon \gamma \right)^c \frac{\pi d_c^2}{4}} \quad (3.4)$$

Изменение температуры в зависимости от коэффициента массы экзотермической смеси для различных значений коэффициента заполнения порошковой проволоки, рассчитанное по этой формуле, представлено на рис.3.1.

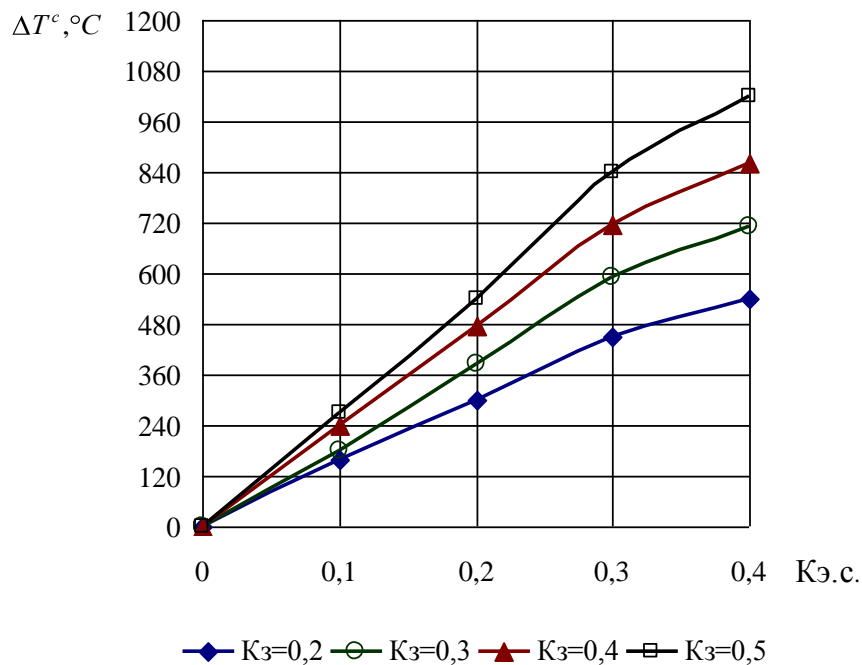


Рисунок 3.1 – Зависимость изменения температуры сердечника от коэффициента массы экзотермической смеси для различных значений  $K_3$

Как видно из рис. 3.1 сердечник нагревается в пределах от 540 °С до 1000 °С в зависимости от коэффициента заполнения порошковой проволоки. Чем больше  $K_{э,с}$  и  $K_з$ , тем больше температура нагрева сердечника порошковой проволоки.

### 3.2 Эффективность расплавления и наплавки самозащитной порошковой проволокой с экзотермической смесью в сердечнике

Для определения влияния эффекта экзотермического процесса, возникающего при плавлении самозащитной порошковой проволоки с экзотермической смесью в шихте сердечника, на показатели расплавления ( $\alpha_p$  – коэффициент расплавления,  $\alpha_n$  – коэффициент наплавки,  $\psi$  – коэффициент общих потерь,  $\psi_p$  – коэффициент потерь на разбрызгивание), в сравнении с теми же показателями самозащитных порошковых проволок, не содержащих экзотермической смеси, в шихту последних проволок вместо экзотермической смеси  $Q_{э,с}$  вводилось такое же количество смеси железного и алюминиевого порошков  $Q_{пор}$ .

Для исследований были изготовлены самозащитные порошковые проволоки по методике, приведенной в п. 2.2, с различным содержанием экзотермической смеси окалина-алюминий, и смеси железного и алюминиевого порошков. Содержание экзотермической смеси и смеси железного и алюминиевого порошков в шихте сердечника изменялось от 0 до 50 масс % через каждые 10%. Однопроходная наплавка валиков выполнялась на пластины из низкоуглеродистой стали ВСт3пс размером 10×100×200 мм при напряжении на дуге 29...30 В и постоянной во всех опытах скорости подачи проволоки  $V_{пп} = 120$  м/ч.

Исследования СПП с различным содержанием экзотермической смеси показали, что при увеличении количества экзотермической смеси в составе



шихты сердечника порошковой проволоки наблюдается уменьшение величины сварочного тока при сохранении постоянными остальных параметров режимов сварки.

Мгновенное значение величины сварочного тока в процессе наплавки порошковой проволокой может изменяться вследствие характерных особенностей капельного переноса электродного металла, изменений положения точки фактического токоподвода, колебаний площади поперечного сечения оболочки или коэффициента заполнения проволоки шихтой и т.п. Поэтому для оценки влияния экзотермической смеси в шихте СПП на величину сварочного тока выполнялись его интегральные измерения на достаточно протяженном временном интервале по методике, приведенной в п. 2.4.

Результаты измерений времени достижения заданного напряжения  $U_3 = 4 \text{ В}$ , взятое исходя из оптимального времени усреднения сварочного тока, в зависимости от количества экзотермической смеси в составе шихты сердечника порошковой проволоки и расчет величины сварочного тока приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 - Влияние количества экзотермической смеси в шихте сердечника порошковой проволоки на величину сварочного тока

№ п/п	Содержание смеси, $Q_{э.с.}$ , масс. %	Время $t$ , с	Сварочный ток $I_{св}$ , А	Мощность сварочной дуги $q$ , кДж/с	Тепло реакции $q_x$ , кДж/с	Общая тепловая мощность $q_{\Sigma}$ , кДж/с
1	0	59,3	450	13,50	0	13,5
2	10	59,8	446	13,38	0,17	13,55
3	20	60,5	441	13,23	0,34	13,57
4	30	61,7	432	12,96	0,60	13,56
5	40	67,5	395	11,85	0,68	12,53
6	50	72,1	370	11,10	0,86	11,96

По данным табл. 3.1 построена графическая зависимость величины

сварочного тока от количества экзотермической смеси в составе шихты сердечника порошковой проволоки, приведенная на рис. 3.2.

Анализ приведенного графика и данных табл. 3.1 показывает, что с увеличением количества экзотермической смеси в составе шихты сердечника порошковой проволоки, при устойчивом протекании экзотермической реакции, величина сварочного тока уменьшается с 450 до 370 А, что является следствием повышения коэффициента расплавления электрода за счет дополнительного тепла, выделяемого в результате протекания экзотермической реакции.

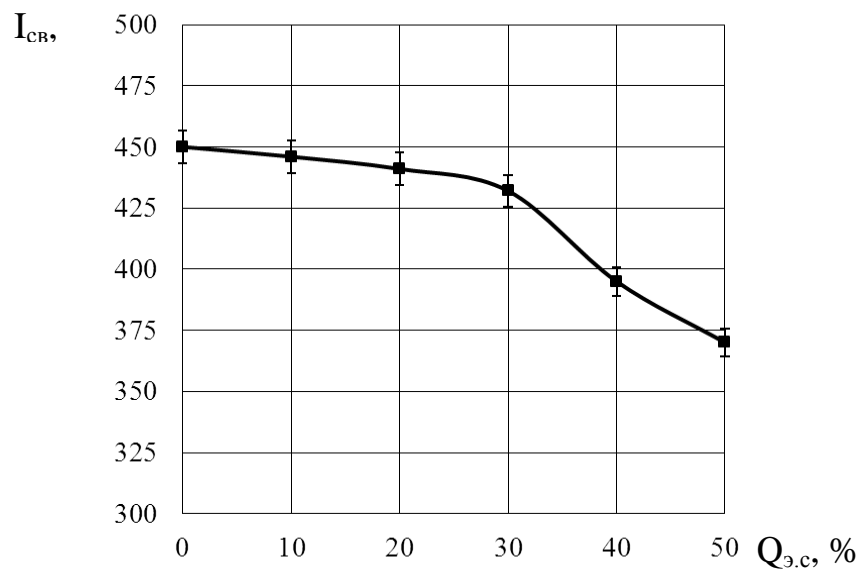


Рисунок 3.2 – Зависимость величины сварочного тока от количества экзотермической смеси в составе шихты сердечника

Результаты расчета тепловой мощности дуги, тепла экзотермических реакций и общей тепловой мощности, выделяемой при плавлении СЭПП, в зависимости от количества экзотермической смеси в составе шихты сердечника СПП приведены в табл. 3.1.

По данным таблицы построим графические зависимости (рис. 3.3).

Анализ полученных данных и графических зависимостей показал, что с увеличением количества экзотермической смеси в составе шихты сердечника

порошковой проволоки увеличивается удельное тепловыделение из неё за 1 с. В тоже время из-за снижения величины сварочного тока уменьшается тепловая мощность дуги, причем, при содержаниях экзотермической смеси больших 30 масс. % более интенсивно чем растет тепло реакции  $q_x$ . Это привело к изменению общей тепловой мощности при плавлении экзотермической порошковой проволоки по кривой с максимумом.

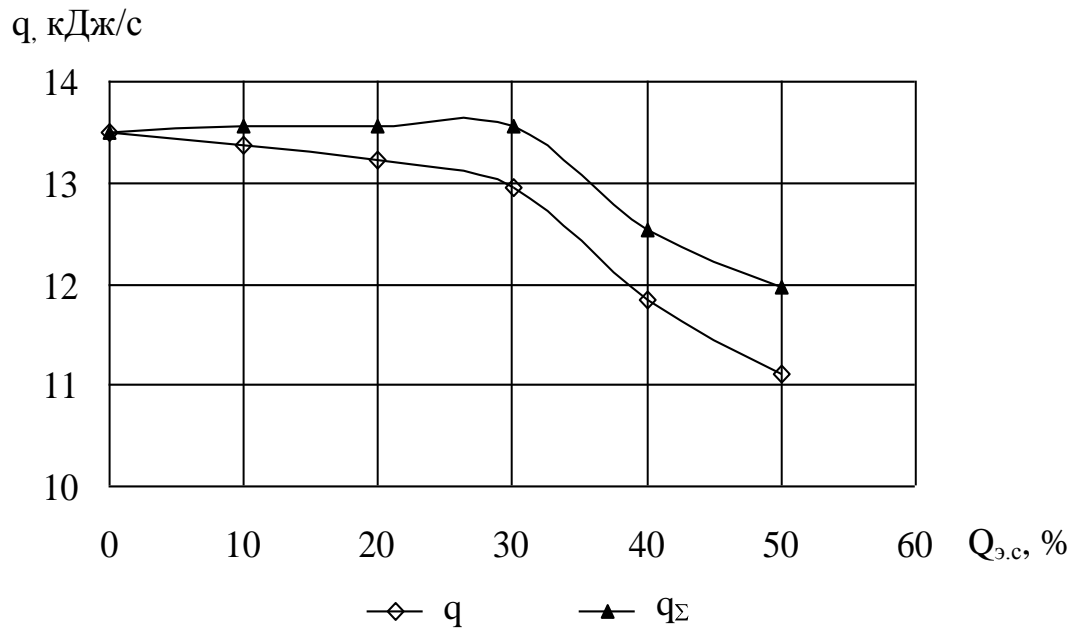


Рисунок 3.3 – Зависимость тепловыделения при плавлении экзотермической порошковой проволоки от количества экзотермической смеси в составе шихты её сердечника.

Падание величины сварочного тока наиболее интенсивно проявляется при содержаниях экзотермической смеси более 35 масс. %. Теплота экзотермической реакции изменяет нагрев разрядного промежутка и эффективный потенциал ионизации газовых составляющих, что приводит к более интенсивному уменьшению величины сварочного тока.

Результаты исследований показателей расплавления и наплавки в зависимости от состава проволоки приведены на графиках, представленных на рис. 3.4 и рис. 3.5.

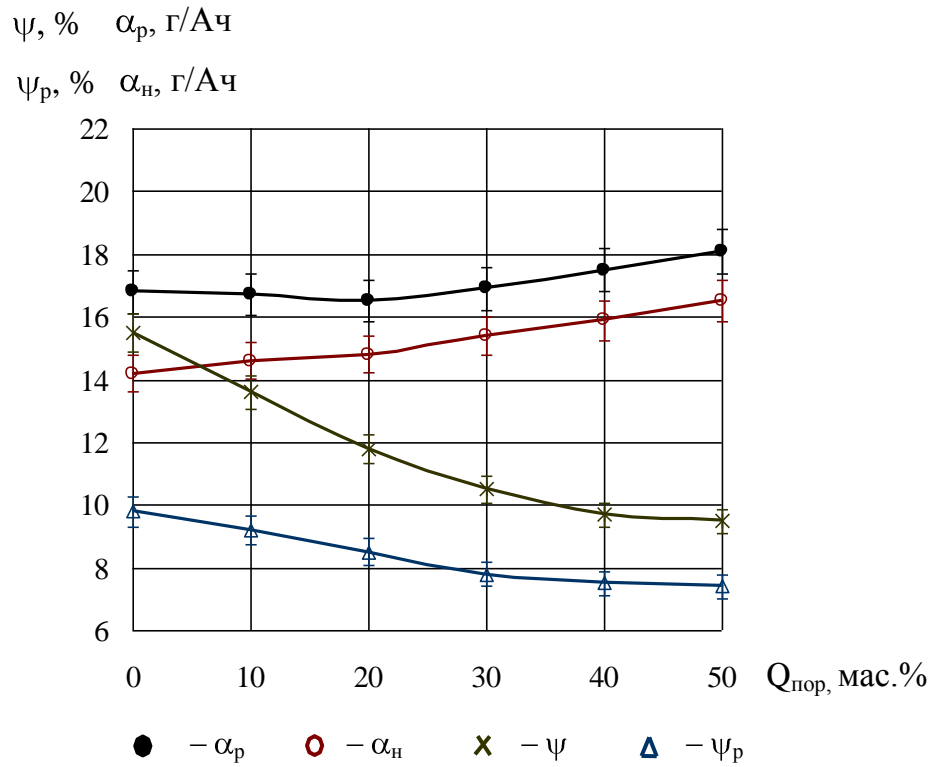


Рисунок 3.4 – Показатели плавления СПП в зависимости от количества смеси порошков железа и алюминия в шихте сердечника

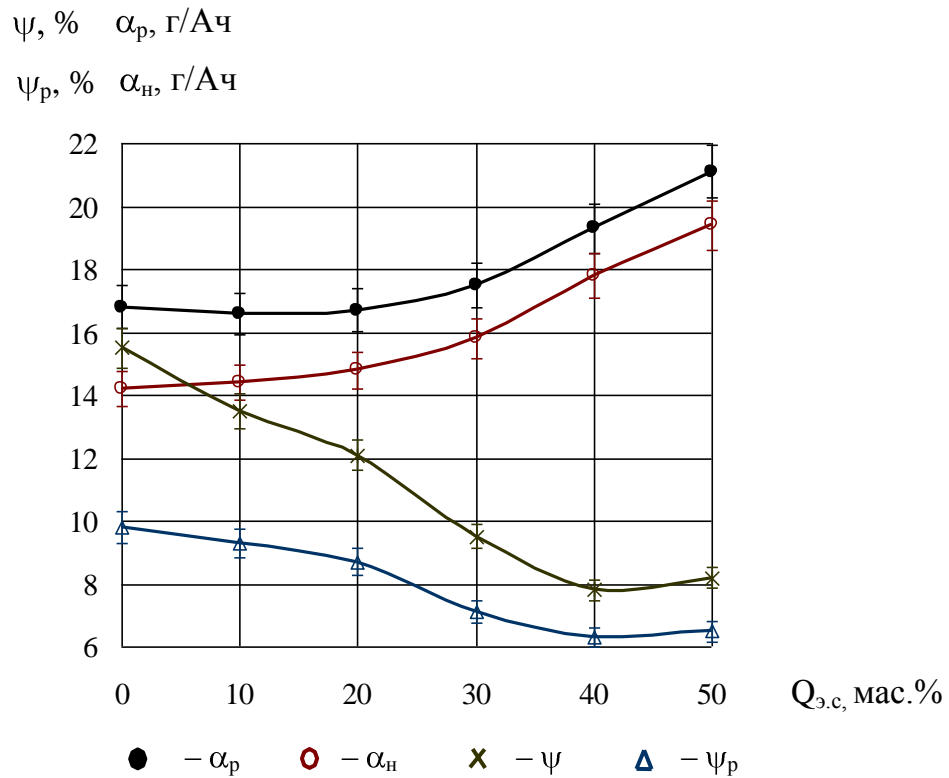


Рисунок 3.5 – Показатели плавления СПП в зависимости от количества экзотермической смеси в шихте сердечника

Из полученных данных следует, что влияние эффекта экзотермической реакции на показатели плавления и наплавки самозащитной порошковой проволоки начинают проявляться при её содержании в шихте сердечника более 30 %. Устойчиво экзотермическая реакция начинает протекать при содержании экзотермической смеси в составе шихты проволоки 35...40 %.

При содержании в шихте сердечника экзотермической смеси 35...40%, показатели плавления самозащитной экзотермической порошковой проволоки (СЭПП) по сравнению с такими же показателями проволок не содержащих экзотермической смеси возрастают:  $\alpha_p$  с 17,5 г/А·ч до 19,4 г/А·ч, а  $\alpha_n$  с 15,8 г/А·ч до 17,8 г/А·ч; то есть на 10,8% и на 12,6%. Увеличение коэффициентов расплавления и наплавки связано с выделением дополнительной теплоты при протекании экзотермической реакции и уменьшением величины сварочного тока при постоянной скорости подачи СПП.

При устойчивом протекании экзотермической реакции наблюдается уменьшение коэффициентов потерь на разбрызгивание и общих потерь, что связано с тепловым эффектом экзотермических реакций, повышающих полноту разложения газообразующих компонентов шихты порошковой проволоки, как на ее вылете, так и на стадии плавления, улучшая защиту зоны дугового разряда. При этом устраняется диссоциация карбонатов в сварочной ванне. Дополнительное тепло повышает стабильность дугового разряда без взрывного отделения капель. Кроме того уменьшение величины сварочного тока, при устойчивом протекании экзотермической реакции, способствует уменьшению силы Пинч-эффекта, а следовательно и потерь на разбрызгивание. При содержании экзотермической смеси равном 40 % проявляются минимальные потери. Дальнейшее увеличение количества экзотермической смеси приводит к возрастанию потерь на разбрызгивание и общих потерь.

Таким образом, на основе проведенного анализа, с точки зрения обеспечения высоких коэффициентов расплавления и наплавки и снижения потерь электродного металла, содержание экзотермической смеси в составе шихты СЭПП целесообразно ограничить 40 %.

### 3.3 Влияние экзотермической смеси в шихте сердечника порошковой проволоки на характер ее плавления и химическую неоднородность наплавленного металла

Сердечник самозащитной порошковой проволоки оплавляется в направлении продольной оси на эффективную толщину (рис. 3.6), которая по данным измерений изменяется в пределах 18...40 % его массы, что подтверждает данные работы [130]. Это явление связано с нагревом сердечника вследствие контакта с жидким металлом электродной капли, а также за счет тепла дуги и сварочной ванны.



Рисунок 3.6 – Расположение электродной капли на торце порошковой проволоки в процессе горения дуги

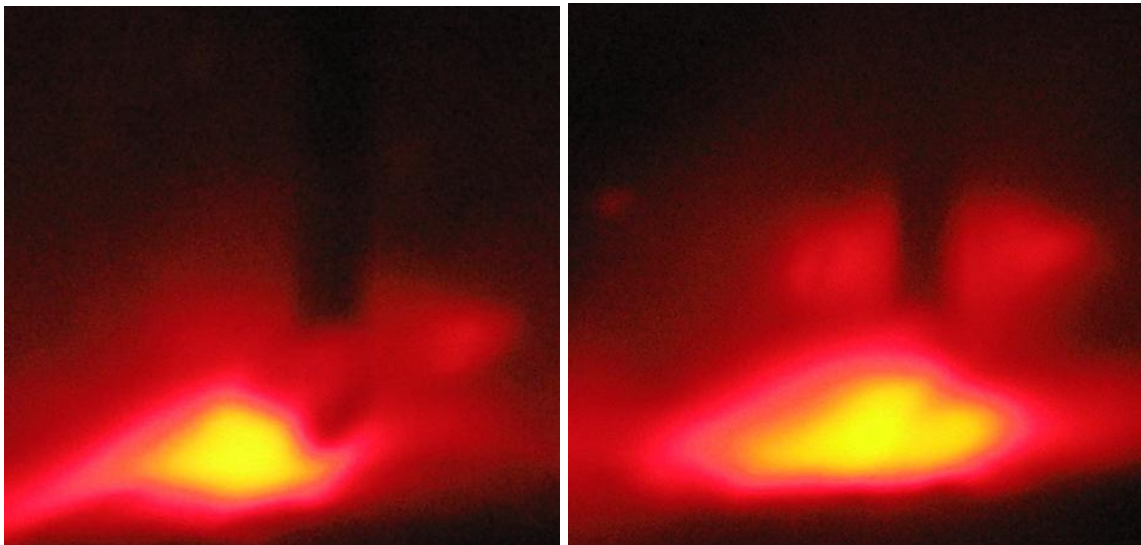
На рисунке 3.6 наблюдается более интенсивное плавление оболочки, чем сердечника. Капли образующиеся на конце стальной оболочки, имеют преимущественно неправильную форму, определяемую суммарным влиянием всех сил, действующих на неё. В процессе своего роста капля хаотически перемещается вокруг сердечника порошковой проволоки, оставляя неоплавленной часть стержня в виде выступа.

При отставании плавления сердечника ухудшается физическая защита шлаком металла электродных капель от воздействия их с атмосферой

воздуха. Кроме того, отставание плавления сердечника уменьшает долю участия шихты сердечника порошковой проволоки в металлургических процессах, протекающих на стадии капель. Но самым большим недостатком при таком характере плавления является то, что образовавшийся выступ сердечника растет, а достигнув определенной длины, зависящей от состава шихты и режима наплавки, разрушается. Куски выступа, попадая в жидкую ванну, расплавляются полностью или частично, вызывая химическую неоднородность наплавленного металла.

В работе исследовалось влияние экзотермической смеси на равномерность плавления сердечника и оболочки самозащитной порошковой проволоки, и химическую неоднородность наплавленного металла.

Фотографии концов порошковых проволок, содержащих экзотермическую смесь и без экзотермической смеси, в процессе горения дуги представлены на рис. 3.7.



а)

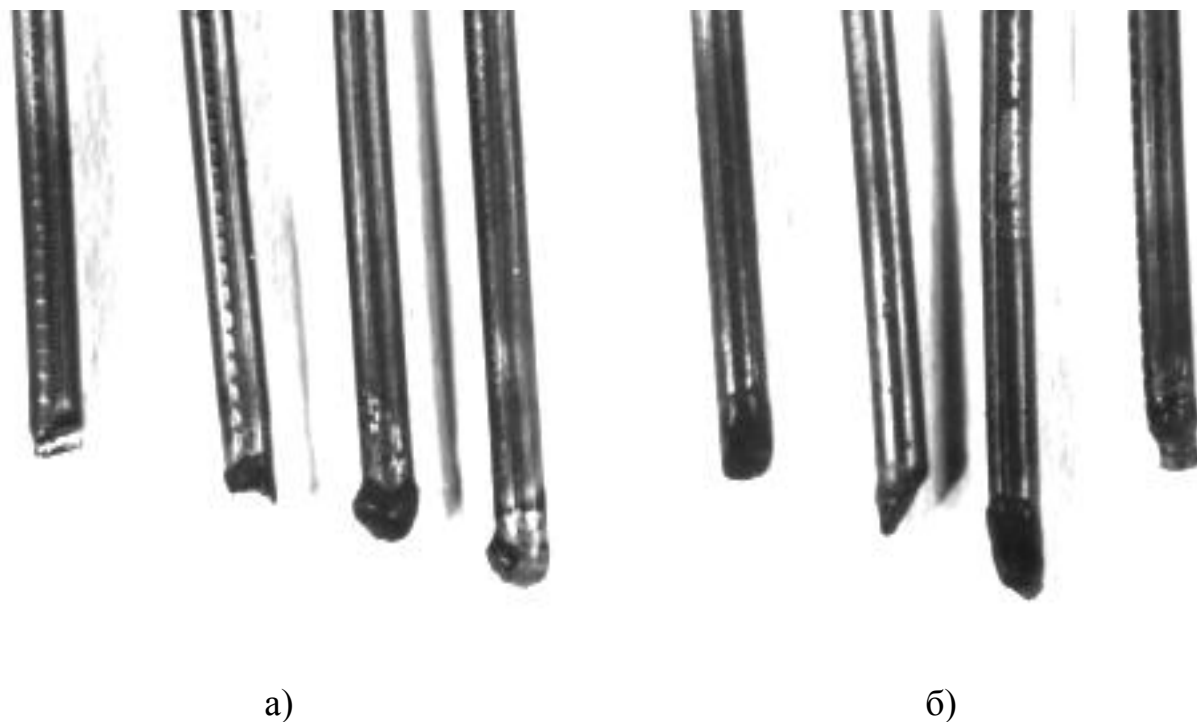
б)

а – СПП с экзотермической смесью в составе шихты; б – СПП без экзотермической смеси

Рисунок 3.7 – Характер плавления самозащитных порошковых проволок (укрупн. 2)

Как видно из рис. 3.7 при плавлении СПП с экзотермической смесью отставание плавления шихты сердечника от оболочки порошковой проволоки значительно уменьшается.

Это подтверждается фотоснимками концов порошковых проволок, отрезанных после наплавки (рис. 3.8, а).



а – СПП с экзотермической смесью в составе шихты; б – СПП без экзотермической смеси

Рисунок 3.8 – Внешний вид концов самозащитных порошковых проволок после наплавки (укрупн. 1,5)

Для оценки равномерности плавления порошковой проволоки использовали методику, приведенную в п. 2.3. Выполнялась однопроходная наплавка валика на поверхность подготовленного образца с фиксированной величиной вылета 32 мм.

После затухания дугового разряда измеряли внутренний диаметр



проволоки и длину выступа сердечника. Результаты измерений и расчеты по формуле (2.11) показали, что при наплавке СПП с экзотермической смесью равномерность плавления  $A = 0,375 \dots 0,5$ , тогда как при наплавке СПП без экзотермической смеси  $A = 0,1 \dots 0,125$ . Следовательно, введение в состав шихты сердечника СПП экзотермической смеси улучшает равномерность плавления сердечника и оболочки порошковой проволоки в 3...4 раза.

Для оценки химической неоднородности металла наплавки производилось определение равномерности распределения хрома по толщине наплавки по методике, приведенной в п. 2.3.

Для определения содержания хрома по толщине наплавки, в зоне сплавления и основном металле производилась четырехслойная наплавка самозащитной порошковой проволокой, содержащей экзотермическую смесь и проволокой, в которой вместо экзотермической смеси использована смесь порошков железа и алюминия. Содержание экзотермической смеси в шихте сердечника составляет 40%. Наплавку образцов осуществляли на режиме  $I_{СВ} = 380 \dots 400$  А,  $U_{д} = 29 \dots 30$  В,  $V_{СВ} = 19,3$  м/ч.

Распределение хрома по толщине наплавки, в зоне сплавления и в основном металле представлено на рис. 3.9.

Классическим показателем однородности значений какого либо параметра является отношение случайных отклонений этого параметра к его среднему значению. Характеристики рассеяния – среднеквадратичные отклонения  $\sigma$  и коэффициент вариации  $K_v$  вычисляются по формулам (2.12) и (2.13) соответственно.

Расчетные данные и данные измерений содержания хрома, отклонений содержания от среднего значения и квадратичное отклонение от среднего содержания приведены в табл. 3.2 [131].

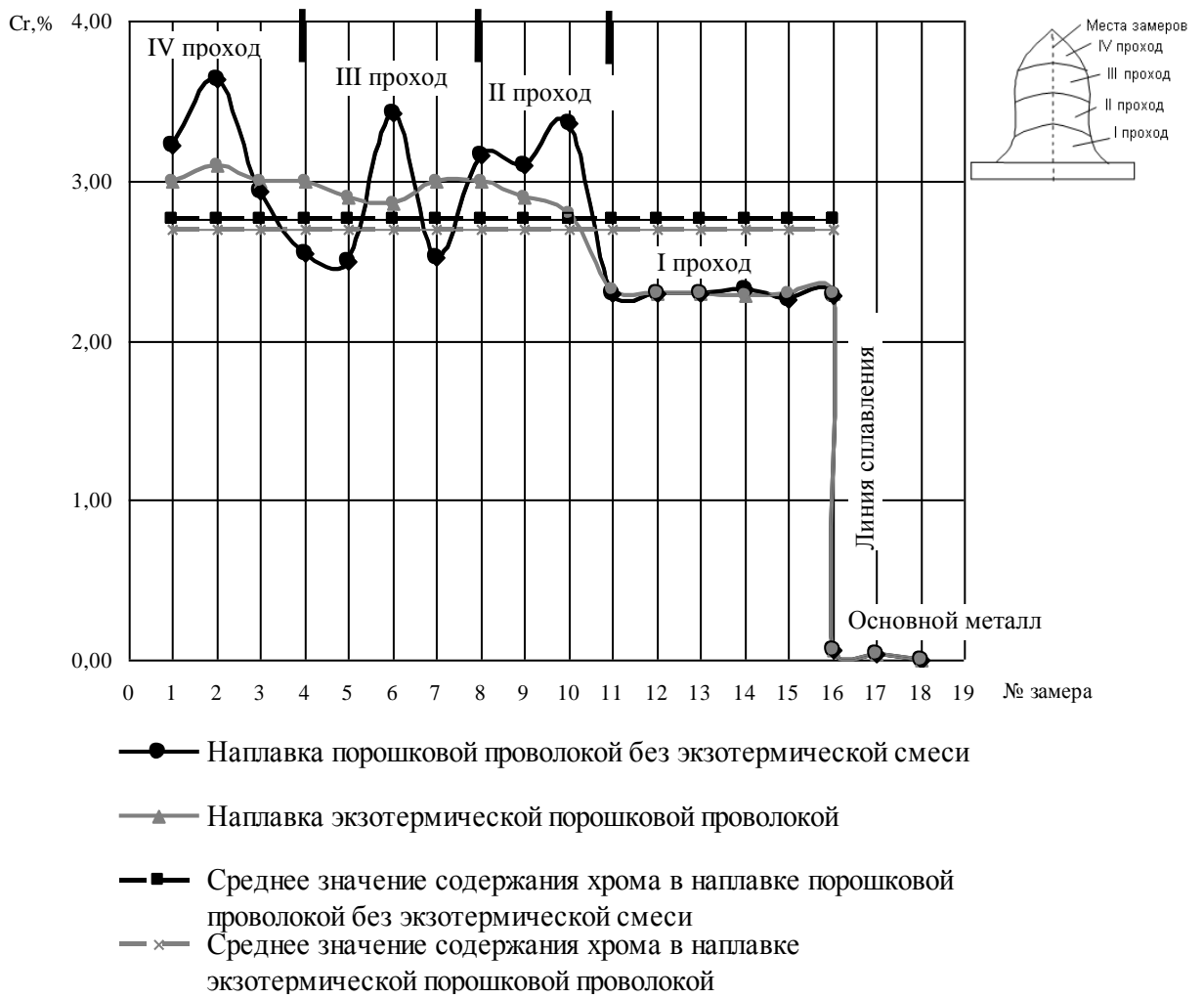


Рисунок 3.9 – Химическая неоднородность наплавленного металла типа 8ХЗГСВ2Ф, устанавливаемая по содержанию хрома

Из полученных данных имеем следующие расчетные значения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{3,627}{15}} = 0,492;$$

$$Kv = \frac{0,492}{2,76} * 100\% = 17,8\%$$

Таблица 3.2 – Данные к расчету коэффициента вариации при наплавке порошковой проволокой без экзотермической смеси в шихте сердечника

№ точки измерения	Содержание хрома $x_i$ , %	Отклонение содержания хрома от среднего $(x_i - M)$	Квадрат отклонения от среднего $(x_i - M)^2$
1	3,22	0,46	0,212
2	3,63	0,87	0,757
3	2,97	0,21	0,044
4	2,54	0,22	0,048
5	2,49	0,27	0,073
6	3,42	0,66	0,436
7	2,52	0,24	0,058
8	3,17	0,41	0,168
9	3,11	0,35	0,123
10	3,36	0,60	0,360
11	2,30	0,46	0,212
12	2,28	0,48	0,231
13	2,29	0,47	0,221
14	2,32	0,44	0,194
15	2,26	0,50	0,250
16	2,27	0,49	0,240
Среднее значение	2,76		$\Sigma$ 3,627

Уменьшению  $K_v$  должно способствовать увеличение теплопроводности сердечника порошковой проволоки, а также улучшение подвода тепла к нему путём усложнения конструкции оболочки. Одним из наиболее эффективных средств уменьшения  $K_v$  является введение экзотермической смеси в шихту сердечника.

Экзотермическая смесь начинает интенсивно вступать в реакцию и выделять теплоту только в области действия дуги, то есть на конце порошковой проволоки, длиной до 3мм, и продолжает реагировать в сварочной ванне. Это обуславливает выравнивание скоростей плавления оболочки и сердечника и более полное перемешивание электродного и основного металла, вследствие лучшей текучести жидкой сварочной ванны. Кроме того, при наплавке на одинаковых режимах порошковая проволока с экзотермической смесью в сердечнике обеспечивает более мелкокапельный перенос, вследствие большего теплосодержания в ней и, следовательно, меньшего коэффициента поверхностного натяжения.

Результаты измерения содержания хрома по толщине наплавки при использовании самозащитной порошковой проволоки с экзотермической смесью в сердечнике приведены на рис. 3.9, а данные для расчета среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  и коэффициента вариации  $K_v$  – в таблице 3.3.

Из данных таблицы 3.3 получаем следующие расчетные значения  $\sigma$  и  $K_v$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1,609}{15}} = 0,327;$$

$$K_v = \frac{0,327}{2,71} * 100\% = 12\%$$

Из сравнения полученных расчетных данных следует, что  $\sigma$  и  $K_v$  при наплавке самозащитной порошковой проволокой с экзотермической смесью в шихте сердечника в 1,5 раза меньше в сравнении с теми же показателями, полученными при наплавке самозащитной порошковой проволокой, не содержащей экзотермической смеси в шихте.

Таблице 3.3 – Данные к расчету  $\sigma$  и  $K_v$  при наплавке порошковой проволокой с экзотермической смесью в шихте сердечника

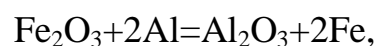
№ измерения	Содержание хрома в точке $x_i$ , %	Отклонение содержания хрома от среднего $(x_i-M)$	Квадрат отклонения содержания хрома в точке от среднего $(x_i-M)^2$
1	2,95	0,24	0,058
2	3,10	0,39	0,152
3	3,0	0,29	0,084
4	3,0	0,29	0,084
5	2,90	0,19	0,036
6	2,85	0,14	0,02
7	2,97	0,26	0,068
8	2,99	0,28	0,078
9	2,92	0,21	0,044
10	2,83	0,12	0,014
11	2,34	0,37	0,137
12	2,32	0,39	0,152
13	2,32	0,39	0,152
14	2,27	0,44	0,194
15	2,30	0,41	0,168
16	2,30	0,41	0,168
Среднее значение	2,71		$\Sigma$ 1,609

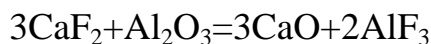
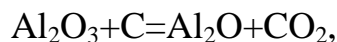
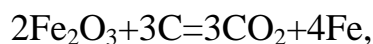
### 3.4 Влияние экзотермической смеси сердечника порошковой проволоки на состав и свойства шлака, образовавшегося при наплавке

Для исследования физических свойств и структуры шлаков применена наиболее часто используемая шлаковая основа самозащитных порошковых проволок: мрамор – плавиковый шпат – рутил. Шлаки этой системы к настоящему времени достаточно изучены. Особенностью их является то, что образующиеся при остывании расплава шлаков титанаты основных оксидов достаточно надёжно защищают металл от взаимодействия с атмосферой воздуха. Плавиковый шпат  $\text{CaF}_2$  диссоциирует в зоне действия дуги и образует летучие фториды, в результате чего снижается содержание водорода в металле сварных швов и содержание серы.  $\text{CaF}_2$ , повышая текучесть шлака, способствует улучшению рафинирования металла сварных швов,  $\text{CaO}$  улучшает физическую защиту металла шва.

Для исследований были изготовлены СПП по методике, приведенной в п. 2.2. В работе исследовались шлаки, образующиеся при наплавке СПП без экзотермической смеси в составе наполнителя (состав А) и СПП в состав которых вводилась экзотермическая смесь (состав Б). Содержание экзотермической смеси в шихте сердечника СЭПП – 40 %. Наплавку валиков осуществляли на пластины из низкоуглеродистой стали ВСт3пс на режиме  $I_{\text{СВ}} = 380 \dots 400 \text{ А}$ ,  $U_{\text{д}} = 29 \dots 30 \text{ В}$ ,  $V_{\text{СВ}} = 19,3 \text{ м/ч}$ . После наплавки с поверхности каждого валика отделялось шлаковое покрытие.

В результате протекания окислительно-восстановительных реакций в составе экзотермической смеси при плавлении СЭПП появляются соединения, изменяющие свойства образующегося при наплавке шлака. К числу этих реакций следует отнести:





Образовавшиеся оксиды алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}$  попадают в шлак. Таким образом, в результате наплавки порошковой проволокой, содержащей экзотермическую смесь в сердечнике, образуется шлак, относящийся к шлаковой системе  $\text{CaF}_2\text{--CaO--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}$ . Химическим анализом установлено, что содержание оксидов алюминия в составе шлаков составляет 4,5...5 %, при содержании экзотермической смеси в шихте сердечника порошковой проволоки 40%. В результате окисления легирующих элементов, входящих в состав проволоки, образуются оксиды хрома –  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , вольфрама –  $\text{WO}_3$  и ванадия –  $\text{V}_2\text{O}_5$ , их содержание находится в пределах 3...6 %.

В процессе наплавки разрабатываемой СЭПП образуется шлак следующего химического состава  $\text{CaF}_2$  – 28,6...30,0%,  $\text{CaO}$  – 20,2...22,6%,  $\text{TiO}_2$  – 18,3...19,5%,  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}$  – 4,6...5,2%,  $\text{MnO}$  – 4,3...5,3%,  $\text{SiO}_2$  – 7,3...8,9%,  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  – 5,6...7,8%,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 2,6...3,2%,  $\text{WO}_3$  – 1,5...2,1%,  $\text{V}_2\text{O}_5$  – 1,1...1,3%.

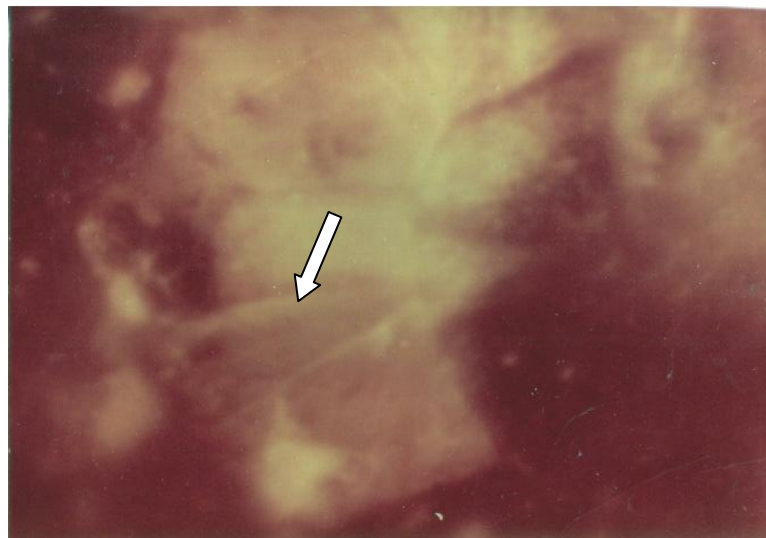
Исследование строения шлаков производили по методике, изложенной в п. 2.1. Проведенными исследованиями установлено наличие химических образований, являющихся общими составляющими шлаков исследуемых порошковых проволок (табл. 3.4) [132].

Таблица 3.4 - Результаты определения состава шлаков

Состав СПП	Общие составляющие шлаков	Отличительные составляющие шлаков
А	$\text{SiO}_2, \text{CaF}_2, \text{FeO}, \text{FeS},$ $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2,$	
Б	$\text{TiO}_2\text{--TiC},$ $\text{TiO}_2\text{--TiN}, \alpha\text{--TiO}_2,$ $\text{FeO}\cdot\text{TiO}_2,$ $\text{CaO}\cdot\text{TiO}_2$	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$

Типичным представителем этих образований является стекловидная фаза содержащая моноокись кремния ( $\text{SiO}$ ), которая не принимает участие в модификационной перестройке, и двуокись кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Стекловидная фаза имеет зеленовато – голубоватый оттенок от растворенных оксидов хрома, но в зависимости от растворения оксидов железа и марганца цвет меняется [139]. В исследуемых шлаках большое количество включений ромбоэдрической формы, которые по диагностическим признакам классифицируются как флюорит. На рис. 3.10 видны характерные полисинтетические двойники, расположенные параллельно граням кристаллов.

Ярко – красные включения в виде строчек содержат в своем составе вюстит ( $\text{FeO}$ ), что подтверждено рентгеновским анализом.

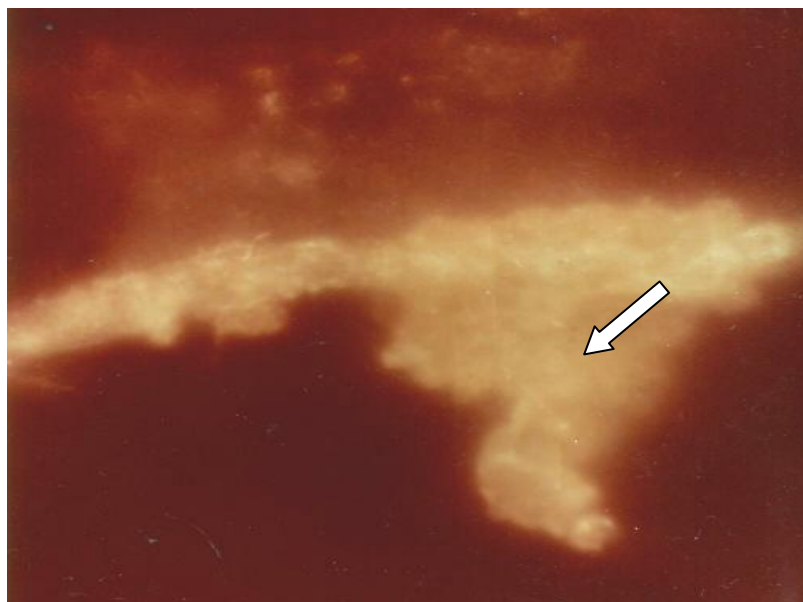


х 410

Рисунок 3.10 – Включения флюорита  $\text{CaF}_2$

Основная масса рутила ( $\alpha\text{-TiO}_2$ ) (рис. 3.11) образует ряд соединений с оксидами железа, как правило, неправильной формы, цвет рутила золотисто-бурый. На образцах шлака видны включения рутила неправильной формы с очень яркими и мелкими включениями нитридов титана ярко – золотистого цвета, а также розовые оттенки карбидов титана.

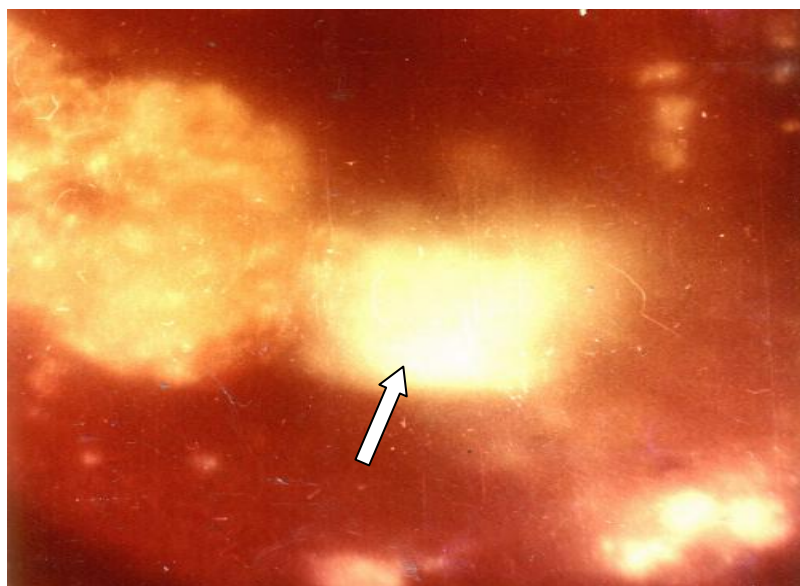




x 410

Рисунок 3.11 – Включения рутила  $\alpha - TiO_2$  с вкраплениями нитридов

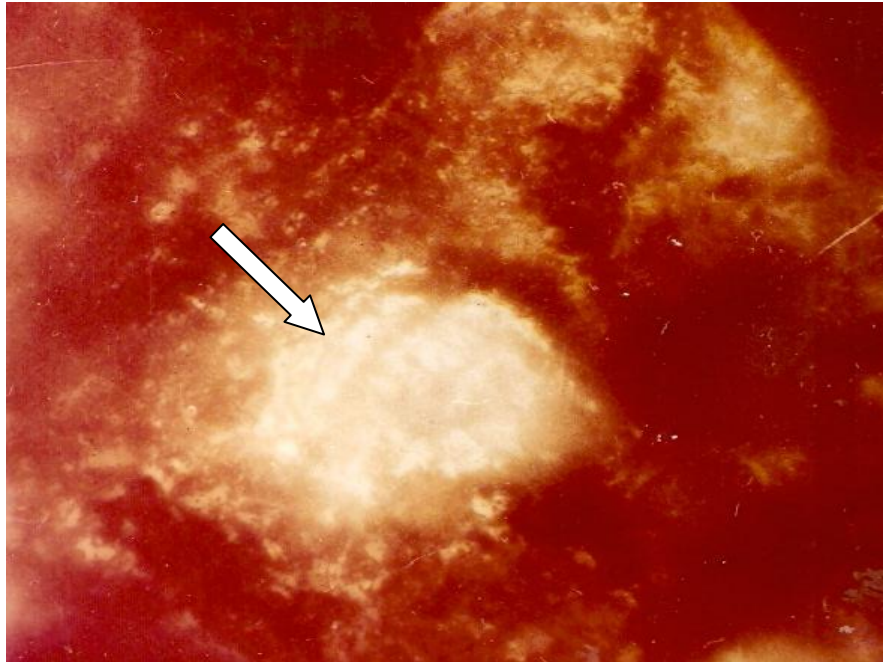
С оксидом железа двуокись титана образует ильменит (рис. 3.12)  $FeO \cdot TiO_2$ , который способен растворять до 30%  $Fe_2O_3$  [133]. Форма выделений ильменита - неправильная.



x 410

Рисунок 3.12 – Ильменит  $FeO \cdot TiO_2$

В структуре шлаков наблюдаются дендритные образования, которые можно классифицировать как двух-кальциевые силикаты ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) (рис. 3.13). Основная масса двух-кальциевого силиката претерпевает превращение в  $\gamma$ -модификацию, что сопровождается увеличением объема.

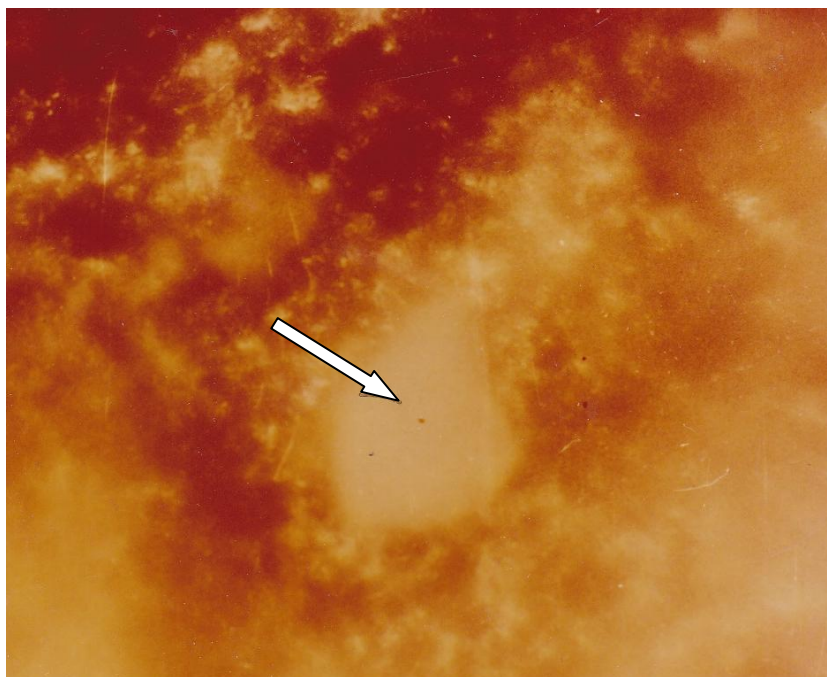


x 410

Рисунок 3.13 – Двухкальциевый силикат  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$

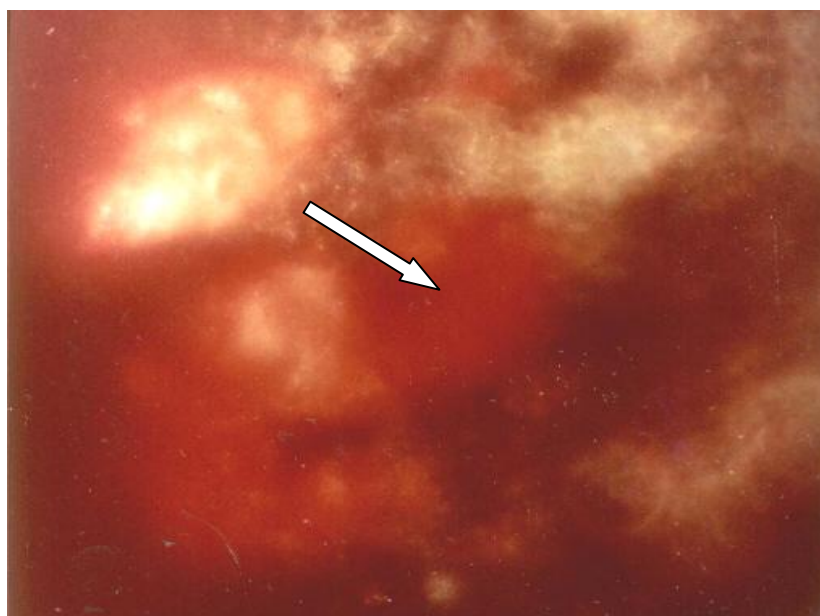
Включения перовскита ( $\text{CaO}\cdot\text{TiO}_2$ ) (рис. 3.14), присутствующие в шлаках, отличаются яркими окрасками, от золотисто-желтой до темно-красной, в зависимости от примесей хрома различной валентности.

Общими составляющими исследуемых шлаков являются также оксиды и сульфиды железа. Доказательством наличия оксида железа (рис. 3.15) в исследуемых наплавочных шлаках является растворение ярко-красных включений при действии соляной кислоты.



x 410

Рисунок 3.14 – Перовскит  $\text{CaO}\cdot\text{TiO}_2$

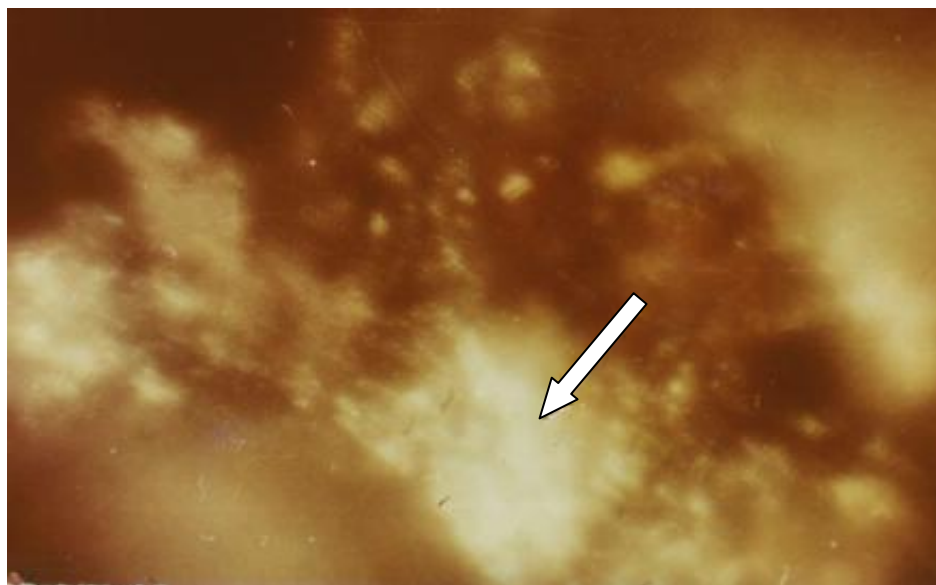


x 410

Рисунок 3.15 – Включения оксида железа

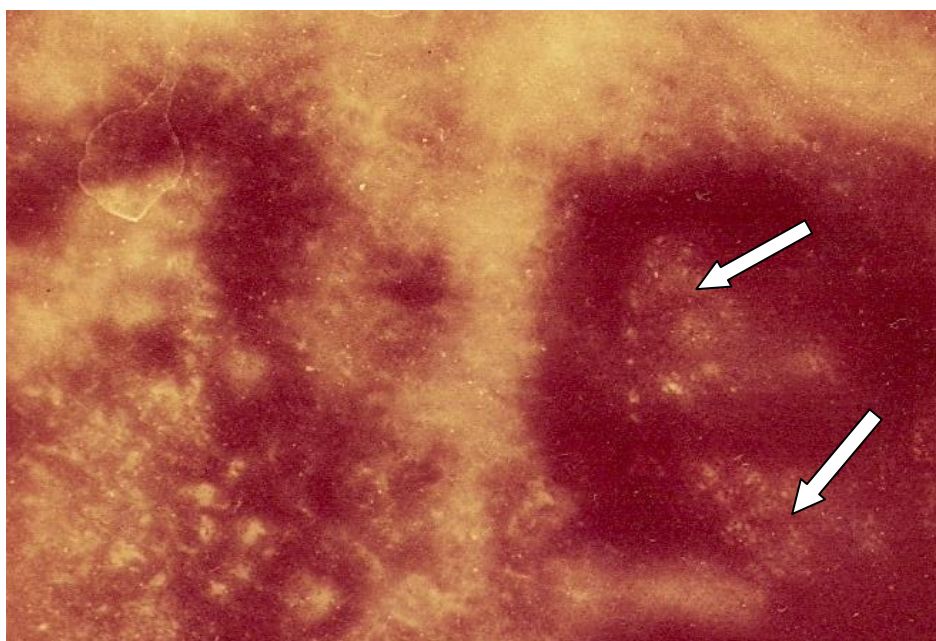
Рентгеновский анализ также показал наличие оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$  и  $\text{V}_2\text{O}_5$  в составе шлаков.

В составе шлаков, образующихся при наплавке порошковой проволокой содержащей экзотермическую смесь, появилась смесь алюминатов (рис. 3.16) типа  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$  и  $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$  (рис. 3.17), характеризующая его физические свойства [132].



x 410

Рисунок 3.16 – Включения алюминатов



x 410

Рисунок 3.17 – Включения муллита  $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$

Присутствие оксидов алюминия подтверждается величиной температуры плавления шлака, которая соответствует 1180...1270 К. При таких температурах происходит превращение низкотемпературной модификации  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  в  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Оксид алюминия входит в состав сложных химических соединений. Согласно данным рентгенографических исследований он образует гексогональный кальций –  $\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ , кристаллы которого выявляются в контакте с другими составляющими шлаков, например, флюоритом. Алуминаты представлены в виде призмочек и угловатых зерен, а в составе многофазных шлаковых глобулей – в срастании со шпинелью и стеклофазой (рис. 3.17). Наиболее устойчивым соединением в данном шлаке является муллит ( $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ).

Проведенные исследования показали что, образующиеся при наплавке порошковыми проволоками шлаки представляют собой конгломерат кристаллов отдельных твердых фаз, сцементированных некоторым количеством стеклообразного вещества. Кристаллические образования, являющиеся структурными составляющими наплавочных шлаков по своему составу аналогичны некоторым породообразующим минералам. Часть оксидов, их соединений и сульфидов не распадается на отдельные твердые фазы, а сохраняется в растворенном состоянии, образуя гомогенную стекловидную фазу. Соотношение между стекловидной и кристаллической частями шлака зависит от его химического состава, а также от условий его охлаждения [134], которые в данном случае выдерживались постоянным.

Наличие тугоплавких фаз в составе исследуемых шлаков приводит к расширению интервала кристаллизации, то есть интервал насыщения стекловидной фазы закристаллизовавшимися фазами расширяется. Такие условия кристаллизации способствуют образованию шлаков с крупнозернистой структурой. Наличие тугоплавких составляющих в составе шлаков способствует образованию сложных фаз. Результаты масс-спектрометрии подтвердили гипотезу об укрупнении «единицы» течения

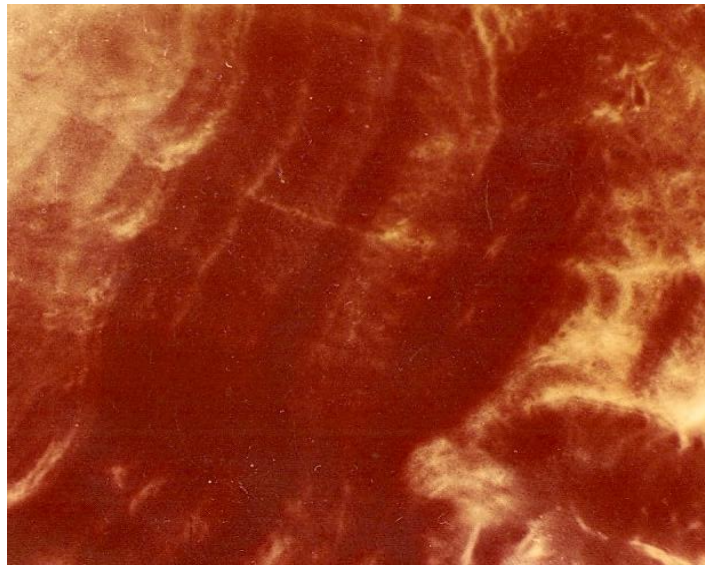
расплава и показали наличие сложных блоков (комплексные соединения) в исследуемых шлаках.

Согласно ионной теории строения шлаков, их плавкость обусловлена прочностью связей в кристаллической решетке между анионами кислорода и катионами элементов состава шлака. На основании обобщенных данных исследования структуры шлаковых расплавов и температуры плавления этих шлаков установлено, что плавление шлаков происходит в определенном интервале температур. Вначале происходит размягчение шлака, что обусловлено плавлением стеклофазы. Окончание температурного интервала плавления связано с плавлением тугоплавких фаз. Чем меньше в структуре шлака стеклофазы ( $\text{SiO}_2$ ) и больше тугоплавких примесей, тем выше температура плавления шлаков. Увеличение содержания  $\text{TiO}_2$  и его соединений в составе шлака также повышают температуру плавления. Кристаллизация таких шлаков начинается раньше, а интервал кристаллизации сдвигается в область более высоких температур, при этом сокращается период твердо - жидкого состояния.

Известно [133], что вязкость определяется природой и составом расплава, а также его температурой. Исследование шлаков при температуре 1600 К показало, что на величину вязкости обратно пропорционально влияет количество стеклообразной массы в шлаке. Наличие комплексных образований типа  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{TiO}_2$  является причиной укрупнения «единицы» течения шлакового расплава. Однако их присутствие увеличивает температурный интервал кристаллизации шлаков. Это способствует превращению двухкальциевого силиката  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  в  $\gamma$  модификацию и приводит к снижению концентрации крупных комплексных анионов кремния, уменьшая тем самым вязкость шлака. Превращение двухкальциевого силиката сопровождается увеличением объема и как следствие разрушением шлака, что положительно сказывается на его отделимости.

Масс-спектры шлаков показали наличие ионов  $\text{Fe}^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{C}^+$ . Наличие ионов газов в шлаке можно объяснить повышенным сопротивлением таких шлаков прохождению газов через их расплав. Высокая вязкость шлака препятствует удалению газов с поверхности наплавленного металла через слой шлакового расплава. Как результат такого явления - наличие газовых каналов в структуре затвердевшего шлака (рис. 3.18).

Наличие больших блоков ( $\text{TiO}_2 \cdot \text{FeO}$ ,  $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  и др.) свидетельствует о рафинировании наплавленного металла. Число новых фаз связано с неодинаковой интенсивностью и полнотой протекания металлургических процессов.



х 410

Рисунок 3.18 – Газовыводящие каналы в структуре шлака

Минералогический состав шлака и его структура оказывают влияние на его физические и технологические свойства.

Нами исследовалось влияние добавок оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на следующие свойства шлака, относящегося к системе  $\text{CaF}_2$ – $\text{CaO}$ – $\text{TiO}_2$ : температуру плавления, плотность, вязкость, поверхностное натяжение. Параллельно исследовалось влияние физических свойств шлаков на

сварочно-технологические свойства порошковых проволок, такие как: кроющая способность шлака и его отделимость.

Методики исследования физических и технологических свойств шлаков приведены в п. 2.1.

Данные измерений температуры плавления при добавках различных оксидов в шлак рутил - флюорит - карбонатной основы приведены на рис. 3.19. В сравнении с оксидами вольфрама, ванадия и хрома оксид алюминия довольно существенно снижает температуру плавления шлака.

Изменение плотности шлака в зависимости от содержания в нем оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  приведено на рисунке 3.20. Исследовалось влияние каждого из оксидов при фиксированном значении других исследуемых оксидов.

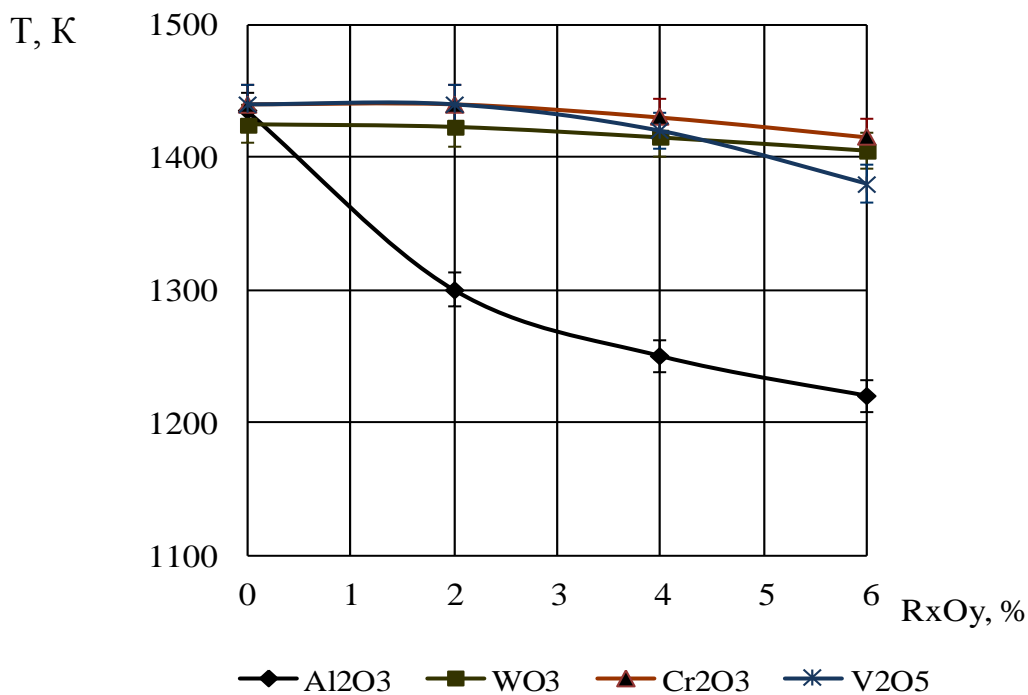


Рисунок 3.19 – Зависимость температуры плавления шлака от содержания оксидов



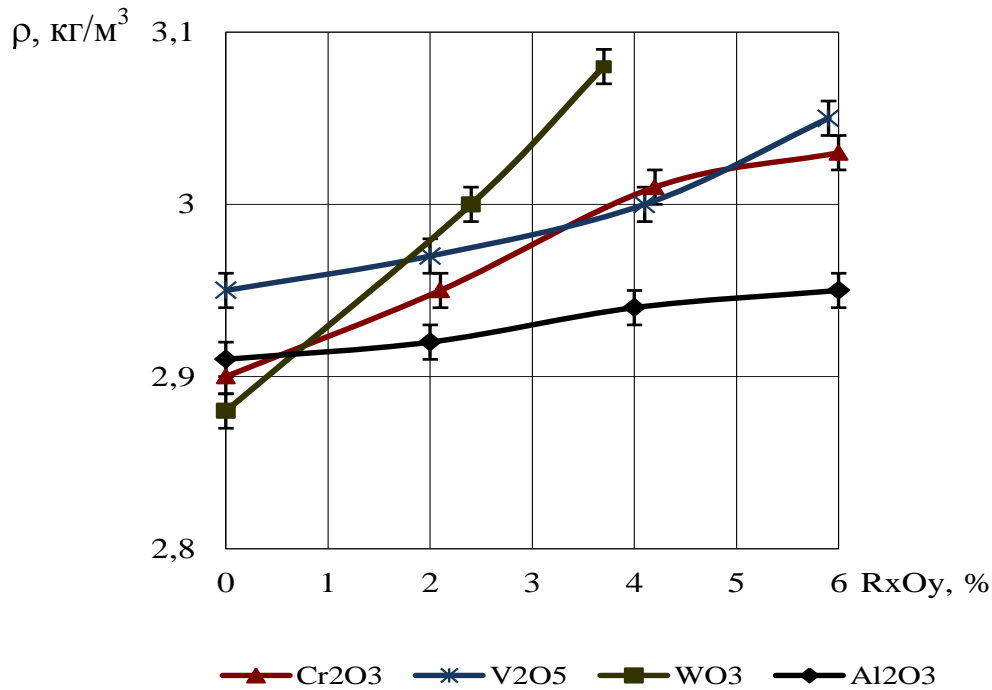


Рисунок 3.20 – Зависимость плотности наплавочного шлака от количества оксидов, образующихся в нем при плавке

Как видно из рис. 3.20 наибольшую плотность имеют шлаки, содержащие оксид  $\text{WO}_3$ . Оксид алюминия на плотность шлаков существенного влияния не оказывает.

Зависимость вязкости шлака от содержания одного из оксидов в исходном шлаке при  $T = 1600 \text{ K}$  представлена на рис. 3.21.

Повышение вязкости объясняется усилением межчастичных связей в расплаве в результате наличия больших концентраций сильных катионов  $\text{TiO}_2$  и анионов кислорода. Введение оксида хрома значительно увеличивает вязкость шлака при температуре 1600 К. С увеличением количества оксидов алюминия, вязкость возрастает незначительно. Оксиды вольфрама и ванадия снижают вязкость расплавленного шлака, причем с увеличением количества  $\text{V}_2\text{O}_5$  вязкость шлака уменьшается больше, чем при таком же количестве  $\text{WO}_3$ . Все это объясняется свойствами анионов и катионов, которые образуются при диссоциации этих оксидов.

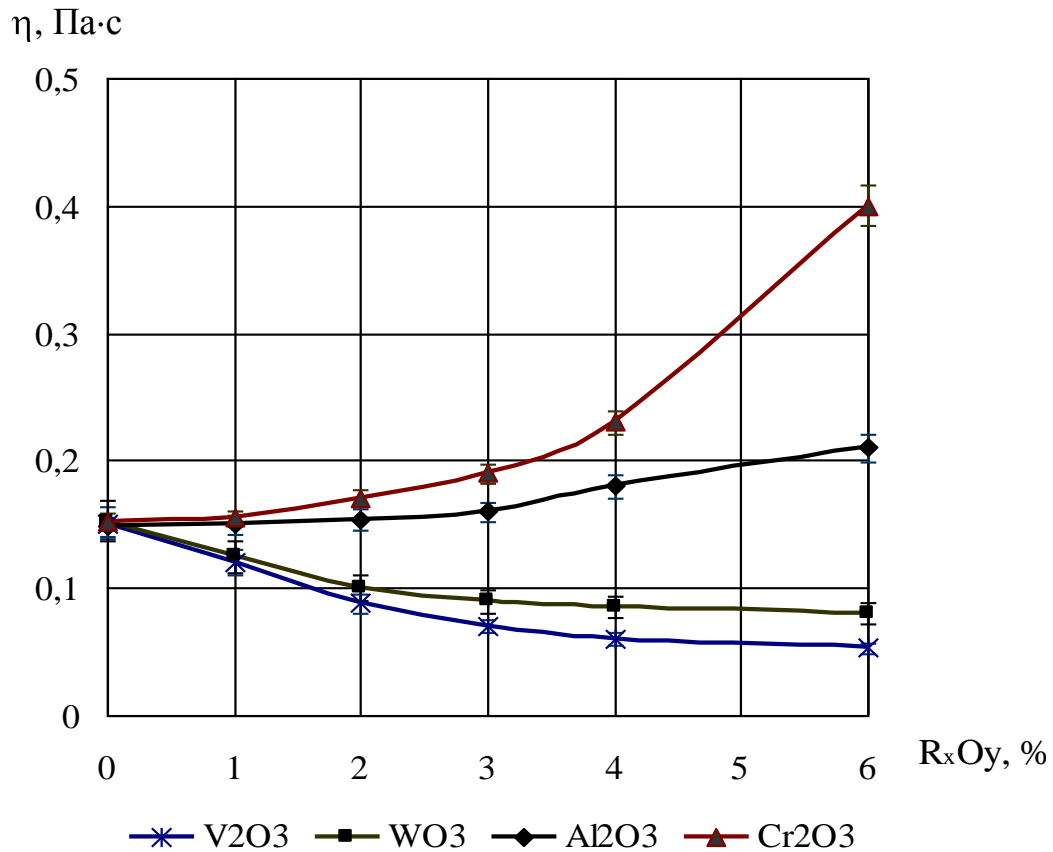


Рисунок 3.21 – Зависимость вязкости шлака от содержания оксидов

В зависимости от состава шлака, особенно, в многокомпонентных системах, вязкость не представляет собой, как известно [84], аддитивную сумму вязкости отдельных компонентов. Минимум вязкости также не отвечает постоянным тенденциям. Наблюдения показывают, если температура плавления фаз (минералогические кристаллические фазы – стеклофазы) близки друг другу, то шлак «короткий», то есть кристаллизация его протекает быстрее, а вязкость понижается при низких температурах. Для чистоты металла очень важен температурный интервал кристаллизации, так как увеличение его способствует рафинированию металла.

Зависимость поверхностного натяжения от температуры измерения представлена на рисунке 3.22. В исходный состав шлака вводился один из исследуемых оксидов в количестве 6 мас. %.

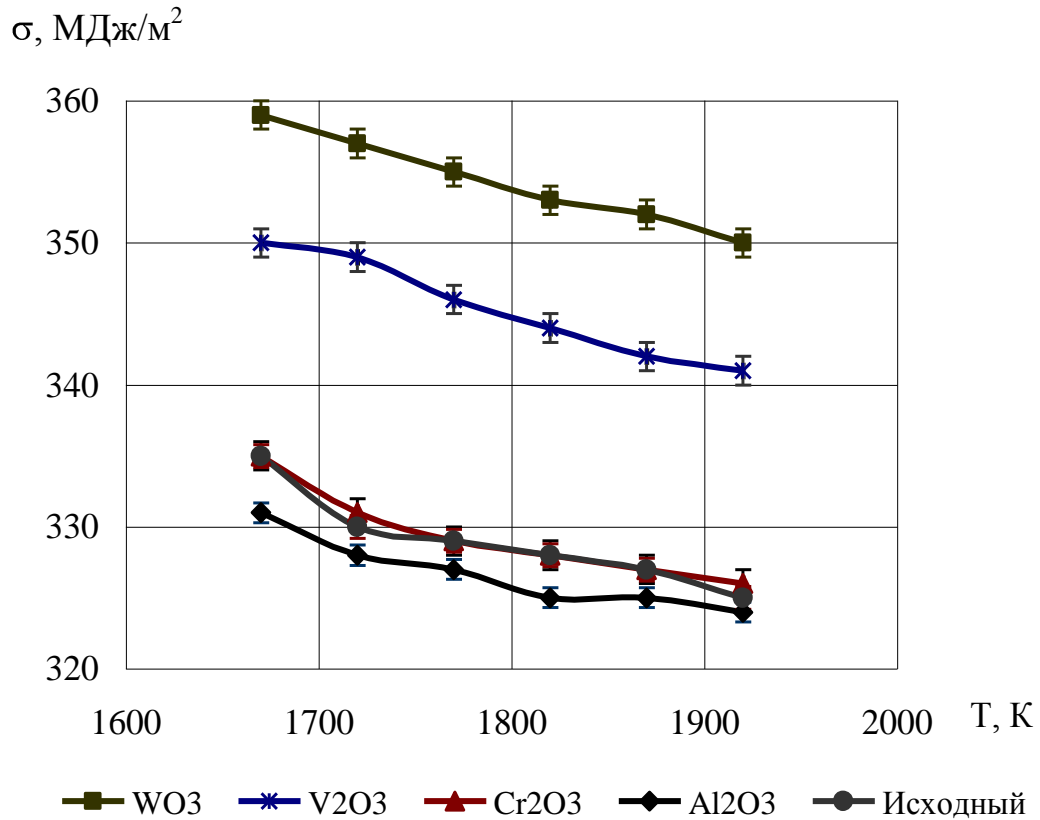


Рисунок 3.22 – Зависимость поверхностного натяжения расплавленного шлака от температуры измерения

Из полученных зависимостей (рис. 3.22) видно, что оксиды алюминия незначительно снижают поверхностное натяжение по сравнению с исходным шлаком. Оксид  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  практически не влияет на поверхностное натяжение шлака, а оксиды  $\text{V}_2\text{O}_5$  и  $\text{WO}_3$  существенно увеличивают его. Оксиды  $\text{V}_2\text{O}_5$  и  $\text{WO}_3$  имеют величину средней энергии связи  $\text{Me}-\text{O}$  больше, чем другие оксиды, входящие в состав шлака. Замена оксидов с меньшей энергией связи оксидами с большей энергией связи способствует усилению межчастичного взаимодействия и повышению поверхностного натяжения.

Наличие в шлаках тугоплавких соединений таких как:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  приводит к качественному изменению свойств исследованных шлаков, и как следствие, влияет на технологичность наплавки – кроющую способность и отделимость шлаковой корки, на наличие пор и включений в наплавленном металле.

Отделимость шлаковой корки – один из важнейших показателей технологичности наплавочных материалов. Производительность многослойной наплавки во многом определяется характером отделимости шлака.

Зависимость отделимости шлака от содержания в нем оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  представлена на рис. 3.23.

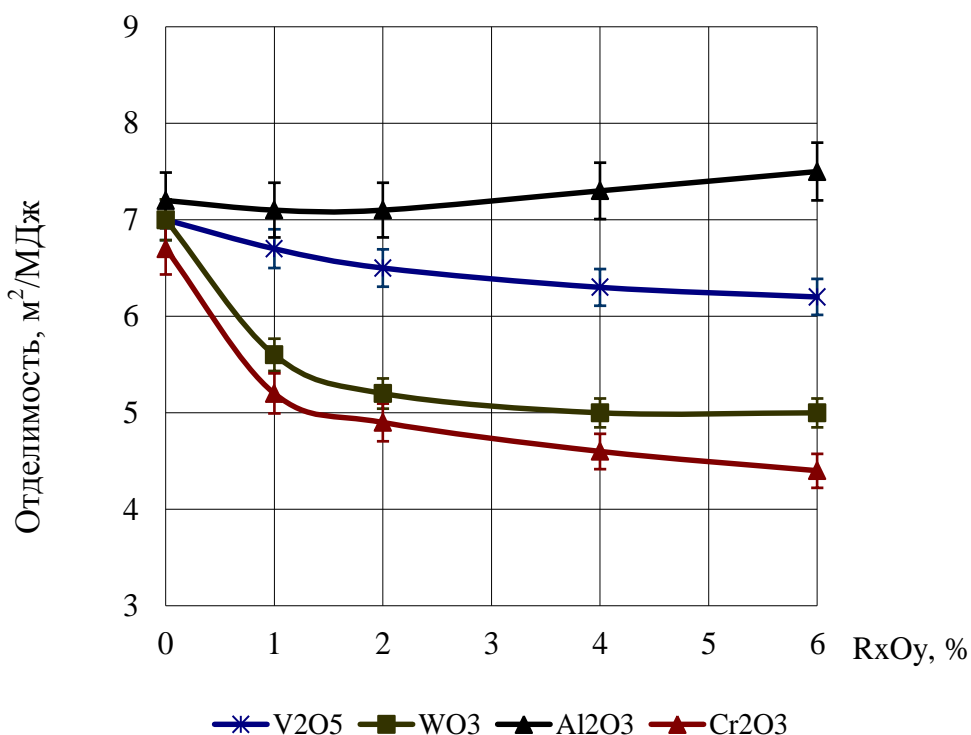


Рисунок 3.23 – Зависимость отделимости шлаковой корки от количества оксида в шлаке

Как видно из рис. 3.23 с увеличением количества оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$  и  $\text{V}_2\text{O}_5$  в шлаке его отделимость ухудшается. Отделимость зависит преимущественно от эпитаксиального срастания шлака и металла шва, что возможно, если они имеют на границе раздела фаз близкую структуру. При введении тугоплавких оксидов в шлак количество кристаллических составляющих шлака возрастает, что способствует их срастанию с такими же оксидами на поверхности металла. Фактором, способствующим отделимости шлака, является перестройка структуры отдельных составляющих, например,

переход  $\gamma$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в  $\alpha$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Эта перестройка проявляется в изменении объема фаз составляющих шлака, что вызывает разрушение границы шлак – металл и улучшает отделимость шлака. Этим и объясняется улучшение отделимости шлака при увеличении в нем количества оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , образующегося в результате протекания экзотермической реакции.

Влияние типа оксида и его содержание в шлаке на кроющую способность шлака приведено на рис. 3.24.

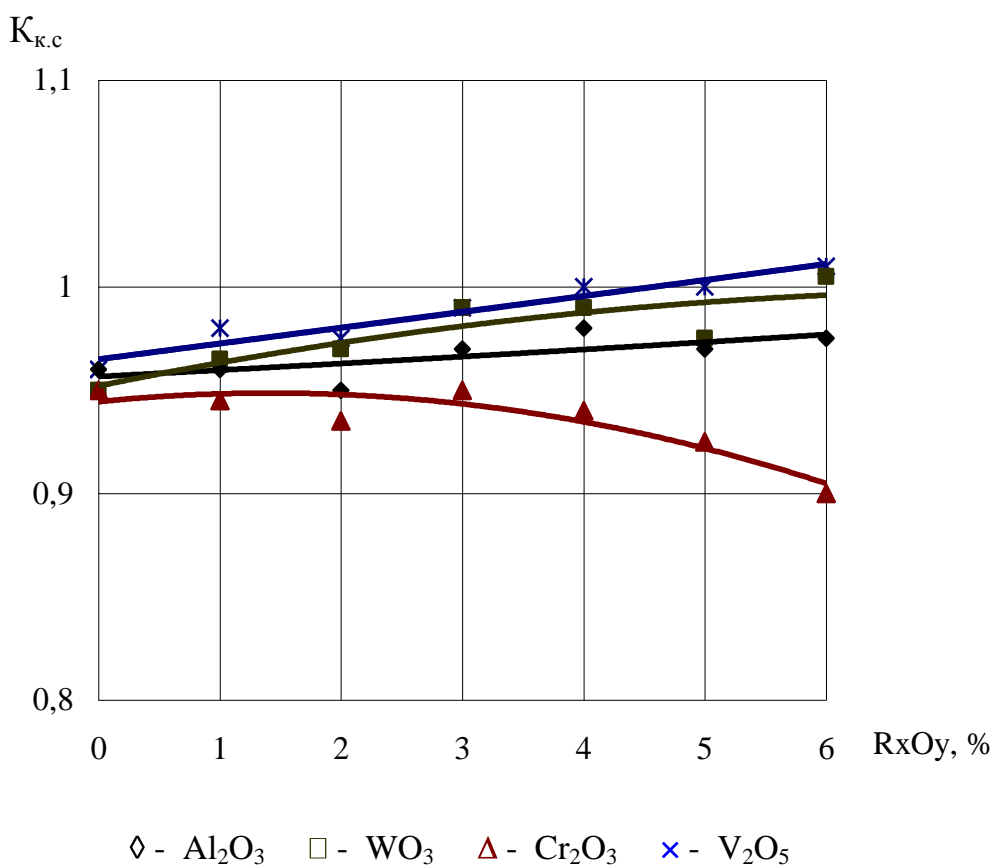


Рисунок 3.24 - Зависимость кроющей способности  $K_{к.с}$  шлака от типа и содержания оксида

С увеличением содержания  $\text{WO}_3$  и  $\text{V}_2\text{O}_5$  кроющая способность шлака возрастает, с увеличением содержания оксида  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  — уменьшается, а введение оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в шлак практически не влияет на кроющую способность шлака. Такое влияние типа и количества оксидов связано с их влиянием на такие свойства как вязкость и поверхностное натяжение.

Например, росту  $K_{к.с}$  при введении  $WO_3$  и  $V_2O_5$  способствует снижение вязкости шлака, а уменьшение  $K_{к.с}$  при введении  $Cr_2O_3$  вызвано существенным повышением вязкости шлака при введении этого оксида в шлак в количестве до 5...6 %.  $Al_2O_3$  мало влияет на величину вязкости, поэтому и  $K_{к.с}$  практически не изменяется.

### Выводы по разделу 3

1. Определен оптимальный состав экзотермической смеси в шихте сердечника СПП в виде окалины и алюминиевого порошка, обеспечивающий управляемую экзотермическую реакцию с тепловым эффектом достаточным для подогрева сердечника самозащитной порошковой проволоки и выравнивания скорости его плавления и оболочки.

2. Установлено, что при наплавке с постоянной скоростью подачи проволоки с увеличением количества экзотермической смеси в составе шихты сердечника порошковой проволоки, при устойчивом протекании экзотермической реакции, величина сварочного тока уменьшается с 450 А до 370 А.

3. Введение экзотермической смеси в состав сердечника СПП приводит к повышению коэффициентов расплавления и наплавки на 10,8% и на 12,6% соответственно, и уменьшению потерь электродного металла. Содержание экзотермической смеси в составе шихты СЭПП целесообразно ограничить 40 %.

4. Введение экзотермических смесей в состав шихты СПП обеспечивает равномерное плавление оболочки и сердечника. При наплавке СЭПП снижается химическая неоднородность наплавленного металла, среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  содержания хрома и коэффициент вариации  $K_v$  в 1,5 раза меньше в сравнении с этими же показателями,

полученными при наплавке самозащитной порошковой проволоки, не содержащей экзотермической смеси в шихте.

5. Газошлаковая основа рутил-карбонатно-флюоритового типа применяемая при наплавке порошковой проволокой, содержащей экзотермическую смесь в шихте, образует шлак, относящийся к шлаковой системе  $\text{CaF}_2\text{--CaO--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ .

Для исследуемых шлаков характерна структурная неоднородность, общей составляющей всех исследуемых шлаков является стекловидная фаза, оксиды железа, сульфиды железа, а также наличие оксидов легирующих элементов. Различие в шлаковых системах предопределяется появлением алюминатов типа  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$  и  $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ .

6. Установлено, что введение экзотермической смеси в состав шихты порошковой проволоки способствует снижению температуры плавления и поверхностного натяжения шлака, увеличению его плотности и вязкости. Такое изменение физических свойств шлака обеспечивает хорошую кроющую способность, отделимость шлакового покрытия, формирование наплавленного металла.

## РАЗДЕЛ 4

### РАЗРАБОТКА САМОЗАЩИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ С ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСЬЮ

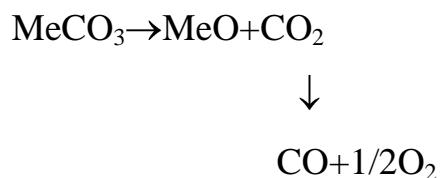
#### 4.1 Усовершенствование состава газообразующей части наполнителя самозащитной экзотермической порошковой проволоки

В наполнителе самозащитных порошковых проволок (СПП) применяются минералы, которые обеспечивают газошлаковую защиту металла от окислительного и азотирующего воздействия окружающей среды. Газовую защиту реакционной зоны сварки и расплавленного металла в порошковых проволоках карбонатно-флюоритного типа обеспечивают карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов, основной оксид которых, после разложения карбоната, участвует в образовании шлака [64, 135, 136 – 138].

В качестве карбонатов в СПП и покрытиях электродов применяются мрамор  $\text{CaCO}_3$  [6, 137, 139 – 141], магнезит  $\text{MgCO}_3$  [6, 137, 142], сидерит  $\text{FeCO}_3$  [143, 144], карбонат лития  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  [145], поташ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  [146, 147], карбонат натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  [6, 148], карбонаты других металлов, а также комбинированные материалы [64, 135, 136, 141].

Наличие оксидов  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  улучшает стабильность горения дуги, способствует удалению из наплавленного металла вредных примесей серы и фосфора, а также оказывает влияние на физико-химические свойства шлаков.

Диссоциация карбонатов протекает по схеме:





При диссоциации карбонатов разных металлов выделяется разное количество углекислого газа. Количество газов, образующихся при диссоциации карбонатов, входящих в состав шихты СПП, может быть определено по методике Г.Л. Петрова [149]. Расчет количества  $\text{CO}_2$ , образующегося при диссоциации карбонатов рассмотрим на примере диссоциации  $\text{CaCO}_3$ .

Коэффициент заполнения разрабатываемой экзотермической СПП составляет  $K_3 = 0,36 \dots 0,38$ , доля карбоната  $\text{CaCO}_3$ , дающего при диссоциации  $\text{CO}_2$ , в шихте СПП составляет 4,8 %. Тогда на 1 г расплавленной порошковой проволоки приходится 0,37 г шихты, а в пересчете на количество  $\text{CaCO}_3$  в граммах

$$m_{\text{CaCO}_3} = 0,37 \cdot 0,048 = 0,0178 \text{ г}$$

Для определения массы выделяющегося  $\text{CO}_2$  необходимо знать молекулярную массу всех веществ химической реакции распада карбоната. Применительно к диссоциации  $\text{CaCO}_3$  молекулярные массы веществ составляют  $M_{\text{CaCO}_3} = 100$ ,  $M_{\text{CaO}} = 56$ ,  $M_{\text{CO}_2} = 44$ .

Расчет количества углекислого газа, приходящегося на 1 г расплавленного электродного металла, дал следующие результаты

$$m_{\text{CO}_2} = m_{\text{CaCO}_3} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaCO}_3}}$$

При определении объема  $\text{CO}_2$ , образующегося при плавлении 1 г порошковой проволоки, необходимо учесть, что объем грамм-молекулы газа равен  $22400 \text{ см}^3$ . Тогда

$$V_{\text{газа}} = 22400 \frac{m_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}}$$

Вычисленная величина объема газа – условная, так как соответствует температуре 273 К. С повышением температуры объем газа увеличивается и определяется по формуле

$$V_T = V_{273} [1 + \alpha(T - 273)]$$

где  $\alpha$  – коэффициент объемного расширения газа,  $\alpha = 0,00366 \text{ K}^{-1}$ ,

$T$  – температура газа, К.

Результаты расчета объема выделяющегося  $\text{CO}_2$  по приведенной методике для различных карбонатов приведены в таблице 1.

Таблица 4.1 – Результаты расчёта объема выделяющегося  $\text{CO}_2$  для различных карбонатов

Карбонат	$T_{\text{дис.}}, ^\circ\text{C}$	$m_{\text{CO}_2}, \text{г}$	$V_{\text{CO}_2}^{273}, \text{см}^3$	$V_{\text{CO}_2}^{1800}, \text{см}^3$	$V_{\text{CO}_2}^{2400}, \text{см}^3$	$V_{\text{CO}_2}^{2750}, \text{см}^3$
$\text{CaCO}_3$	880-1200	0,0078	4,0	26,6	35,5	40,7
$\text{MgCO}_3$	350-650	0,0093	4,7	31,6	42,1	48,3
$\text{Li}_2\text{CO}_3$	730-1270	0,0106	5,4	36,0	48,0	55,1
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	>1000	0,0074	3,8	25,1	33,5	38,4
$\text{K}_2\text{CO}_3$	>1200	0,0057	2,9	19,3	25,7	29,4
$\text{BaCO}_3$	1000-1450	0,0040	2,0	13,5	18,0	20,6
$\text{FeCO}_3$	>490	0,0067	3,4	23,0	30,6	35,1

Зависимость объема выделяющегося  $\text{CO}_2$  от вида карбоната металла и температуры нагрева приведена на рис. 4.1.

Анализ результатов расчета, данных по температуре диссоциации карбонатов [150, 151] и графических зависимостей показывает, что наибольшее количество выделяющегося  $\text{CO}_2$  обеспечивается при диссоциации карбоната лития при относительно низкой температуре начала диссоциации, в связи с чем  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  обеспечивает хорошую газовую защиту дугового промежутка.

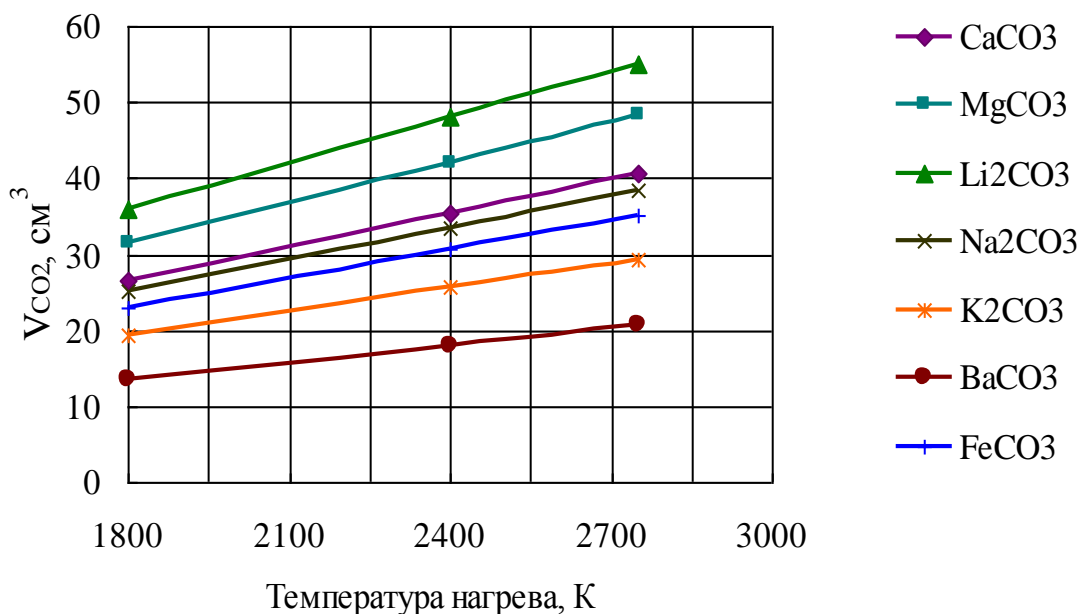


Рисунок 4.1 - Зависимость объема выделяющегося  $\text{CO}_2$  от температуры нагрева

Карбонаты кальция и натрия содержат достаточно большое количество углекислого газа, однако вследствие относительно высокой температуры диссоциации и высокой скорости перемещения в дуговом промежутке диссоциируют не полностью [6] и продолжают диссоциировать в сварочной ванне, способствуя образованию пористости в наплавленном металле.

Карбонат магния проявляет высокие защитные свойства и характеризуется более низкой температурой диссоциации. Он полностью диссоциирует в дуговом промежутке [6], повышая стойкость наплавленного металла против пор. Карбонаты калия и бария выделяют меньшее количество  $\text{CO}_2$ , имеют высокую температуру диссоциации, что ухудшает защитные свойства и способствует образованию пористости.

Сидерит незначительно улучшает защитные свойства наполнителей порошковых проволок и повышает производительность наплавки вследствие восстановления из него железа, однако при отсутствии в составе шихты СПП

необходимого количества раскислителей происходит засорение металла шва оксидами железа.

При разработке самозащитной экзотермической порошковой проволоки (СЭПП), обеспечивающей получение комплексно легированного наплавленного металла, одной из проблем является ограничение объема вводимых компонентов шихты. Введение в состав наполнителя СЭПП достаточно большого количества легирующих элементов, в виде порошков отдельных элементов или ферросплавов, и экзотермической смеси, создает предпосылку к оптимизации газошлаковой составляющей наполнителя проволоки. Введение необходимого количества легирующих элементов и экзотермической смеси может быть достигнуто за счет уменьшения количества газошлакообразующих материалов в сердечнике порошковой проволоки. Вместе с тем это может привести к ухудшению газошлаковой защиты металла шва, появлению дефектов типа пор и общему снижению показателей его механических свойств. Кроме того недостатком СПП является неизбежная пористость ее сердечника. До 20% объема сердечника порошковой проволоки занимают пустоты. При наплавке такой проволокой в дугу вводится достаточно большое количество кислорода и азота, что увеличивает склонность наплавленного металла к порам [6]. Поэтому усовершенствование состава газошлакообразующей части сердечника СЭПП, обеспечивающей надежную защиту от взаимодействия с воздухом является важной задачей при разработке СПП.

Для сохранения защитных свойств СЭПП, снижения содержания газов в металле, в частности азота и кислорода, и обеспечения необходимой степени легирования ряд авторов [6, 64, 138, 152 – 154] использует в качестве газообразующих компонентов сердечника композицию карбонатов металлов. Для созданных композиций стремятся обеспечить равномерное выделение защитных газов в широком диапазоне температур от 400°С до 1500°С. Это гарантирует создание надежной защиты расплавленного металла от воздуха. Также известно [6, 154], что термическая диссоциация карбонатов в

композиции инициируется при более низких температурах, чем в отдельных карбонатах, при общем расширении самого температурного интервала диссоциации. Эффективность защиты при использовании композиции карбонатов, по сравнению с использованием отдельного карбоната, выше, даже если количество защитных газов, образующихся при нагреве и плавлении сердечника проволоки, у отдельного карбоната больше [6]. Это связывают с тем, что при использовании отдельного карбоната процесс образования защитной атмосферы происходит в сравнительно узком диапазоне температур, а применение композиции карбонатов позволяет обеспечить равномерное выделение защитных газов в широком температурном интервале.

Кроме того процессы окисления в период разложения карбонатов развиваются значительно медленнее. Установлено [154], что равномерной термической диссоциации карбонатов в газошлакообразующей части сердечника порошковой проволоки способствует присутствие в смеси с ними фторидов, образующих расплав, в котором инициируется развитие реакций газообразования. При этом создается защитная газовая среда из смеси  $\text{CO}_2$  и летучих фторидов, наличие которых позволяет связывать водород в зоне плавления.

Таким образом, использование композиций карбонатов и фторидов, обеспечивающих при плавлении СПП надежную защиту расплавленного металла, позволяет снизить количество газошлакообразующих веществ в наплавочных СПП до 6...8 % [154].

Анализ приведенных данных послужил основой создания рационального состава газошлакообразующей части сердечника СЭПП. Варьирование содержанием композиции газошлакообразующих позволяет влиять на кинетику газообразования, равномерность и полноту разложения газообразующих компонентов шихты порошковой проволоки, как на ее вылете так и на стадии плавления.

На основе результатов расчёта объема выделяющегося  $\text{CO}_2$  при диссоциации карбонатов и данных [150, 151] по температуре их диссоциации в качестве объекта исследования была взята композиция карбонатов  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , как газообразующая часть сердечника.

Исследовалось влияние соотношения компонентов композиции карбонатов на содержание азота и кислорода в наплавленном металле. Для получения математических моделей, отражающих влияние соотношения компонентов композиции карбонатов на содержание азота и кислорода в наплавленном металле исследовалось 15 вариантов состава сердечника СЭПП с различным соотношением карбонатов, изготовленных по методике, изложенной в п. 2.2. Карбонаты вводились в шихту наполнителей порошковых проволок при оптимальном соотношении газошлакообразующих компонентов – плавикового шпата и рутилового концентрата. Количество газошлакообразующих компонентов в шихте наполнителя составляло 24 массовых процента, что составляет 9 % состава СЭПП. Доля композиции карбонатов в составе газошлакообразующей части шихты составляла 20 %. Содержание экзотермической смеси в шихте наполнителя СПП составляло 40 массовых процентов. Для определения содержания газов производилась многослойная наплавка из которой изготавливались образцы диаметром 4 мм, массой  $0,45 \pm 0,05$  г. Содержание кислорода и азота в наплавке определяли на газоанализаторе ТС-136 фирмы “Лесо”. Наплавку образцов осуществляли СЭПП на режиме  $I_{\text{СВ}} = 380 \dots 400$  А,  $U_{\text{Д}} = 29 \dots 30$  В,  $V_{\text{СВ}} = 19,3$  м/ч. Определение газов на газоанализаторе проводили не позже 36 часов после наплавки.

Для анализа результатов и построения математической модели использовалась программа Statistica 6, являющаяся программным пакетом для статистического анализа, разработанным компанией StatSoft, который реализует функции анализа данных, управления данными, добычи данных, визуализации данных с привлечением статистических методов.

При создании математической модели за основу принят симплексно-центроидный план эксперимента с 4 факторами, рандомизированный порядок опытов и специальная кубическая модель [155, 156].

Исследовали влияние соотношения компонентов композиции карбонатов на содержание азота. Результаты экспериментов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты проведения эксперимента

№	Содержание карбонатов, относительных единиц				Среднее значение содержания азота в наплавке [N], %
	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	
1	1	0	0	0	0,0363
2	0	1	0	0	0,0325
3	0	0	1	0	0,0377
4	0	0	0	1	0,028
5	0,5	0,5	0	0	0,0332
6	0,5	0	0,5	0	0,0375
7	0,5	0	0	0,5	0,0326
8	0	0,5	0,5	0	0,0339
9	0	0,5	0	0,5	0,0298
10	0	0	0,5	0,5	0,0335
11	0,334	0,333	0,333	0	0,0355
12	0,334	0,333	0	0,333	0,0318
13	0,334	0	0,333	0,333	0,034
14	0	0,334	0,333	0,333	0,0329
15	0,25	0,25	0,25	0,25	0,0336

Данные полученные в результате анализа представлены в виде таблиц Statistica 6 (приложение Б).

Адекватность полученной модели проверяется по критерию Фишера F. Вычисленная статистика F сравнивается с табличным значением критерия Фишера. Если модель не адекватна, то необходимо перейти к более сложной модели [155]. Величина значимости при проверке адекватности данной

модели  $p=0,011$ , следовательно полученная модель адекватна с уровнем доверия 98,9 %.

Оценка значимости коэффициентов регрессии производится по критерию Стьюдента. Статически значимыми по критерию Стьюдента коэффициенты модели для различных факторов считаются при уровне значимости  $p < 0,05$ . Если  $p > 0,05$ , то коэффициент считается незначимым и исключается из модели [155].

С учетом значимости коэффициентов модели для всех факторов математическое описание поверхности отклика следующее:

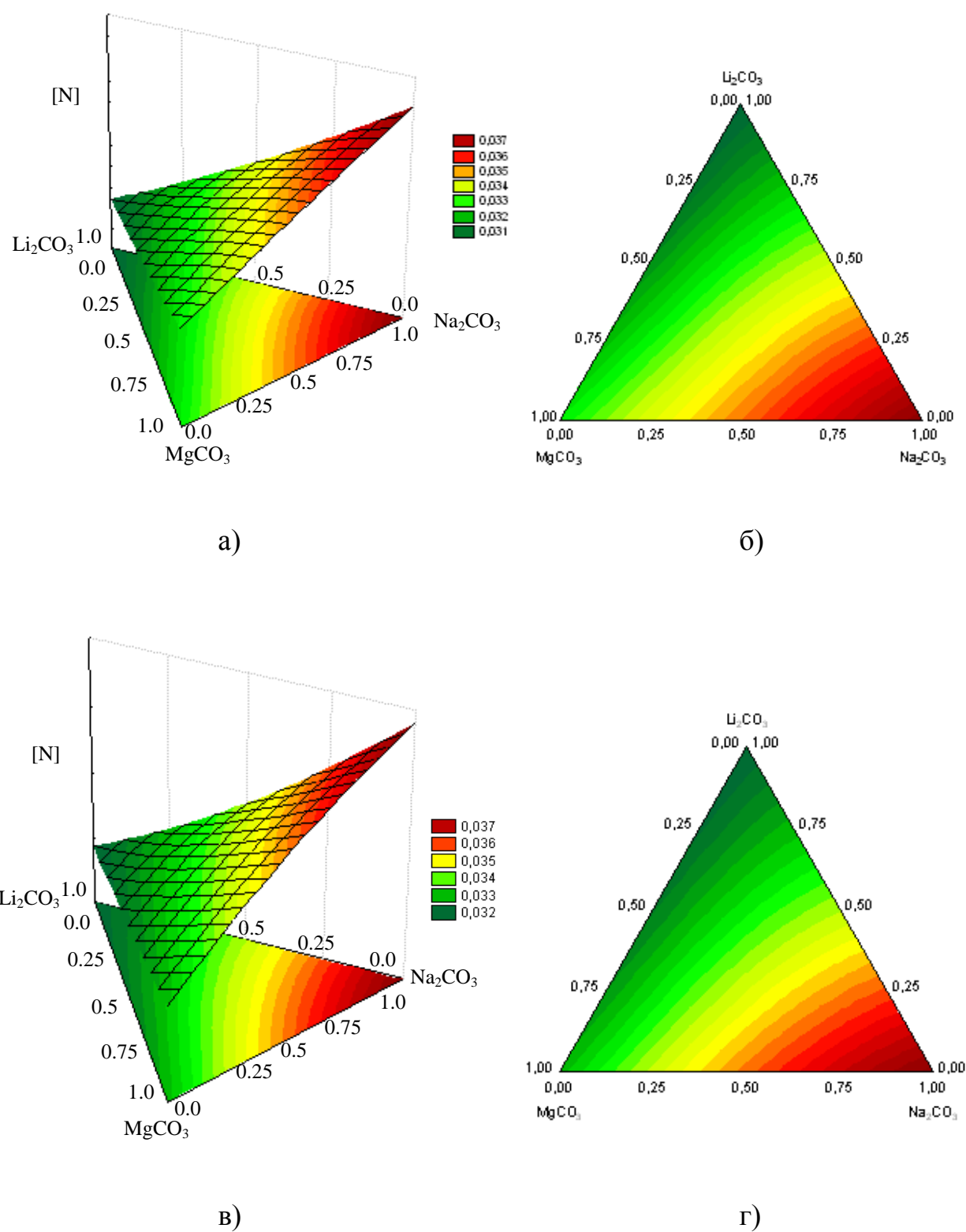
$$\begin{aligned}
 [N]= & 0,0363 \cdot \text{CaCO}_3 + 0,0325 \cdot \text{MgCO}_3 + 0,0377 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 + 0,028 \cdot \text{Li}_2\text{CO}_3 - \\
 & - 0,004784 \text{ CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 - 0,004784 \text{ MgCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 + \\
 & + 0,002616 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Li}_2\text{CO}_3 + 0,022296 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 - \\
 & - 0,01972 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Li}_2\text{CO}_3 + 0,01608 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Li}_2\text{CO}_3 (4.1)
 \end{aligned}$$

Для моделей у которых компонентов смеси больше трех, построение поверхностей отклика производится при некоторых дискретных значениях остальных компонентов. В качестве базового компонента исследуемой композиции карбонатов в нашей модели взят карбонат кальция  $\text{CaCO}_3$ , как наиболее применяемый в качестве газообразующего компонента наполнителей самозащитных порошковых проволок [6, 137, 140, 157], обеспечивающий защиту зоны сварочной дуги и стабильность дугового процесса. Кроме того, основной оксид  $\text{CaO}$  по сравнению с остальными оксидами, образующимися при диссоциации данной композиции карбонатов, в наибольшей степени способствует рафинированию металла шва, связывая серу и особенно фосфор и облегчая их переход в шлак.

Поверхности отклика получаем при фиксированных значениях  $\text{CaCO}_3$  и изменении трех остальных факторов.

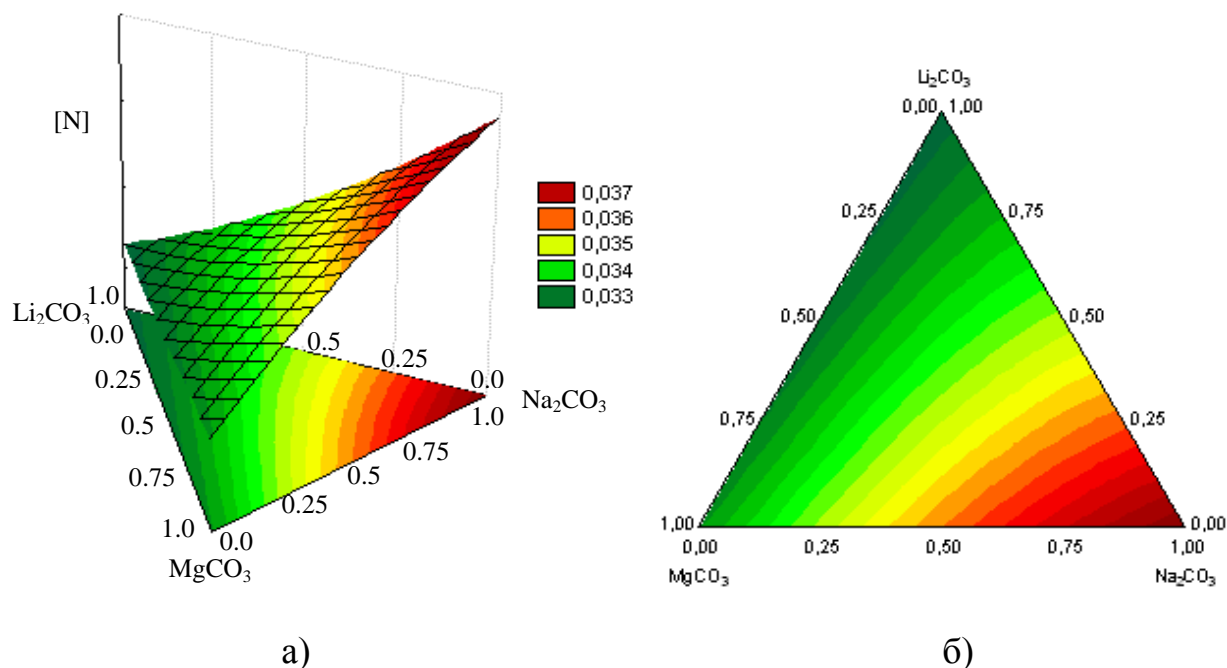
Графическое изображение поверхностей отклика представлено на рис. 4.2 и 4.3.





а - трехмерное изображение ( $\text{CaCO}_3=0,25$ ); б – контурное изображение ( $\text{CaCO}_3=0,25$ ); в - трехмерное изображение ( $\text{CaCO}_3=0,4$ ); г – контурное изображение ( $\text{CaCO}_3=0,4$ )

Рисунок 4.2 – Графические изображения полученной модели



а - трехмерное изображение ( $\text{CaCO}_3=0,5$ ); б – контурное изображение ( $\text{CaCO}_3=0,5$ )

Рисунок 4.3 – Графические изображения полученной модели

Анализ графических изображений поверхностей отклика проводился при минимальном содержании азота в наплавленном металле  $[\text{N}] = 0,032 \dots 0,033 \%$ . Установлено, что наиболее эффективные соотношения композиции карбонатов лежат в области:

- при содержании  $\text{CaCO}_3 = 25\%$ , содержание остальных компонентов:  $\text{Li}_2\text{CO}_3 = 22 \dots 38\%$ ,  $\text{MgCO}_3 = 18 \dots 41\%$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 11 \dots 18\%$ ;

- при содержании  $\text{CaCO}_3 = 40\%$ , содержание остальных компонентов:  $\text{Li}_2\text{CO}_3 = 30 \dots 40\%$ ,  $\text{MgCO}_3 = 10 \dots 25\%$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 5 \dots 10\%$ ;

- при содержании  $\text{CaCO}_3 = 50\%$ , содержание остальных компонентов:  $\text{Li}_2\text{CO}_3 = 30 \dots 40\%$ ,  $\text{MgCO}_3 = 5 \dots 17\%$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 3 \dots 5\%$ .

Полученные соотношения составляющих композиции за счет полной и поэтапной диссоциации обеспечивают качественную защиту дуги и расплавленного металла. Постоянство содержания  $[\text{N}]$  в наплавленном металле сохраняется с увеличением содержания  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  и снижении  $\text{MgCO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Наиболее низкую температуру диссоциации имеет карбонат магния [150], он полностью диссоциирует при подходе к дуговому промежутку и обеспечивает газовую защиту при относительно низких температурах. Наиболее высокую температуру начала диссоциации имеет карбонат натрия, в дуговом промежутке при избыточном содержании в композиции он диссоциирует не полностью [6] и продолжает диссоциировать в сварочной ванне, способствуя образованию пористости в наплавленном металле. Карбонаты кальция и лития начинают диссоциировать при более низких температурах, чем карбонат натрия, за счет чего обеспечивается их более полная диссоциация непосредственно в дуговом промежутке, приводящая к повышению стойкости наплавленного металла против пор. Установленное влияние состава композиции карбонатов обусловлено снижением содержания  $\text{CO}_2$  на ранней стадии дугового процесса, что компенсируется возрастанием объема  $\text{CO}_2$  непосредственно в зоне дуги и расплавленного металла.

Образующиеся при диссоциации композиции карбонатов основные оксиды  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  влияют на физические свойства шлаков. С повышением содержания  $\text{CaO}$ , и особенно  $\text{MgO}$ , увеличивается вязкость основных шлаков. «Длинные», медленно затвердевающие шлаки менее активны по отношению к металлу и отличаются худшими формирующими свойствами. От вязкости шлака зависит его газопроницаемость. Более вязкие шлаки обладают худшей газопроницаемостью [4]. Оксиды  $\text{Li}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  уменьшают вязкость шлака, улучшая его свойства. Наличие в шлаке сложных оксидов двух- и трехвалентных металлов, кристаллизующихся по той же кубической системе, что и  $\text{FeO}$ , ухудшает отделимость шлаковой корки [4]. Оксиды магния способствуют худшей отделимости шлака, чем оксиды кальция. Наличие оксида кальция также благоприятно сказывается на эффективности удаления из наплавленного металла вредных примесей серы и фосфора.

Таким образом, на основе анализа графических зависимостей и приведенных литературных данных в качестве наиболее эффективной

композиции карбонатов, обеспечивающей низкое содержание азота в металле шва, принято следующее соотношение композиции карбонатов  $\text{CaCO}_3 = 40 \%$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3 = 30 \dots 40 \%$ ,  $\text{MgCO}_3 = 10 \dots 25 \%$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 5 \dots 10 \%$ . Данное соотношение обеспечивает надежную защиту металла от азота за счет равномерного выделения защитных газов в широком температурном интервале, повышает стойкость наплавленного металла против пор и улучшает физические и технологические свойства шлаков.

Результаты исследования влияния соотношения компонентов композиции карбонатов на содержание кислорода приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Результаты проведения эксперимента

№	Содержание карбонатов, относительных единиц				Среднее значение содержания кислорода в наплавке [O], %
	$\text{CaCO}_3$	$\text{MgCO}_3$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	$\text{Li}_2\text{CO}_3$	
1	1	0	0	0	0,0219
2	0	1	0	0	0,0198
3	0	0	1	0	0,0214
4	0	0	0	1	0,0243
5	0,5	0,5	0	0	0,0202
6	0,5	0	0,5	0	0,021
7	0,5	0	0	0,5	0,0223
8	0	0,5	0,5	0	0,0195
9	0	0,5	0	0,5	0,0229
10	0	0	0,5	0,5	0,0335
11	0,334	0,333	0,333	0	0,019
12	0,334	0,333	0	0,333	0,0233
13	0,334	0	0,333	0,333	0,0237
14	0	0,334	0,333	0,333	0,0238
15	0,25	0,25	0,25	0,25	0,0219

Данные полученные в результате анализа представлены в виде таблиц Statistica 6 (приложение Б).

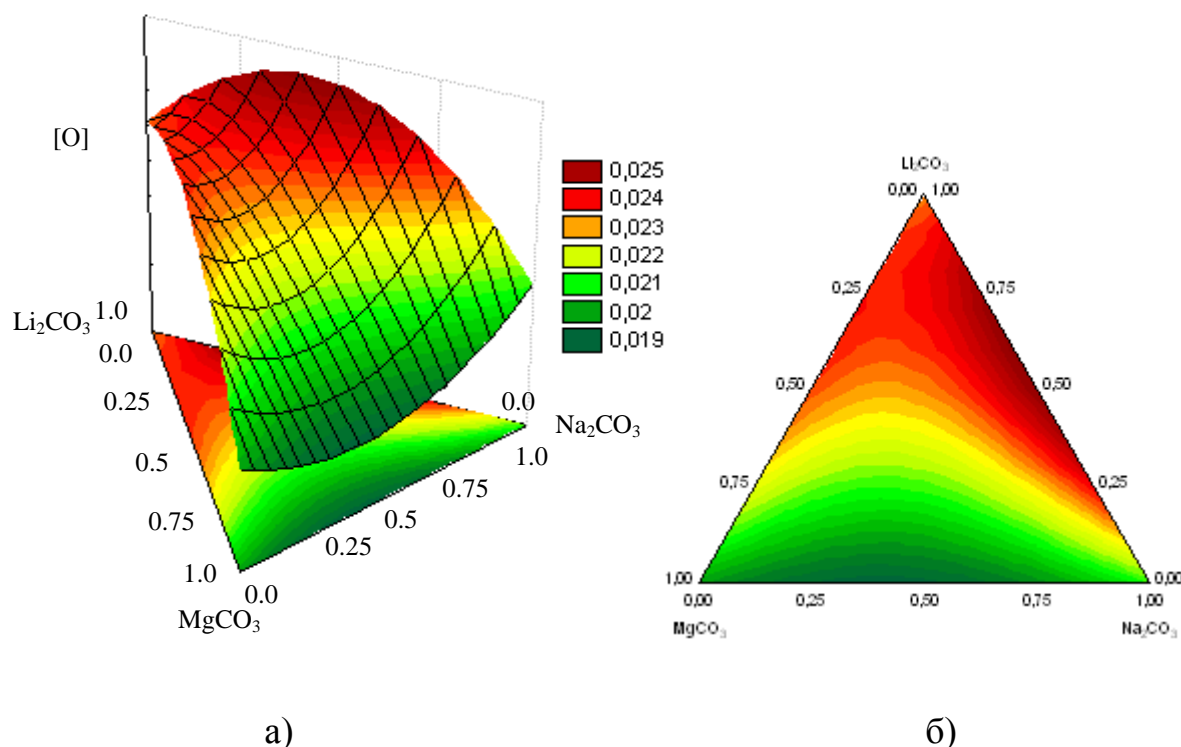
Величина значимости при проверке адекватности данной модели  $p=0,02$ , следовательно полученная модель адекватна с уровнем доверия 98 %

[155]. С учетом значимости коэффициентов модели по критерию Стьюдента для всех факторов математическое описание поверхности отклика следующее:

$$\begin{aligned}
 [O] = & 0,0219 \cdot \text{CaCO}_3 + 0,0198 \cdot \text{MgCO}_3 + 0,0214 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 + 0,0243 \cdot \text{Li}_2\text{CO}_3 - \\
 & - 0,00322 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{Li}_2\text{CO}_3 - 0,00442 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 + 0,00338 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{Li}_2\text{CO}_3 + \\
 & + 0,04258 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Li}_2\text{CO}_3 - 0,025553 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 + \\
 & 0,042922 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{Li}_2\text{CO}_3 - 0,078029 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Li}_2\text{CO}_3 - \\
 & - 0,070806 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Li}_2\text{CO}_3
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

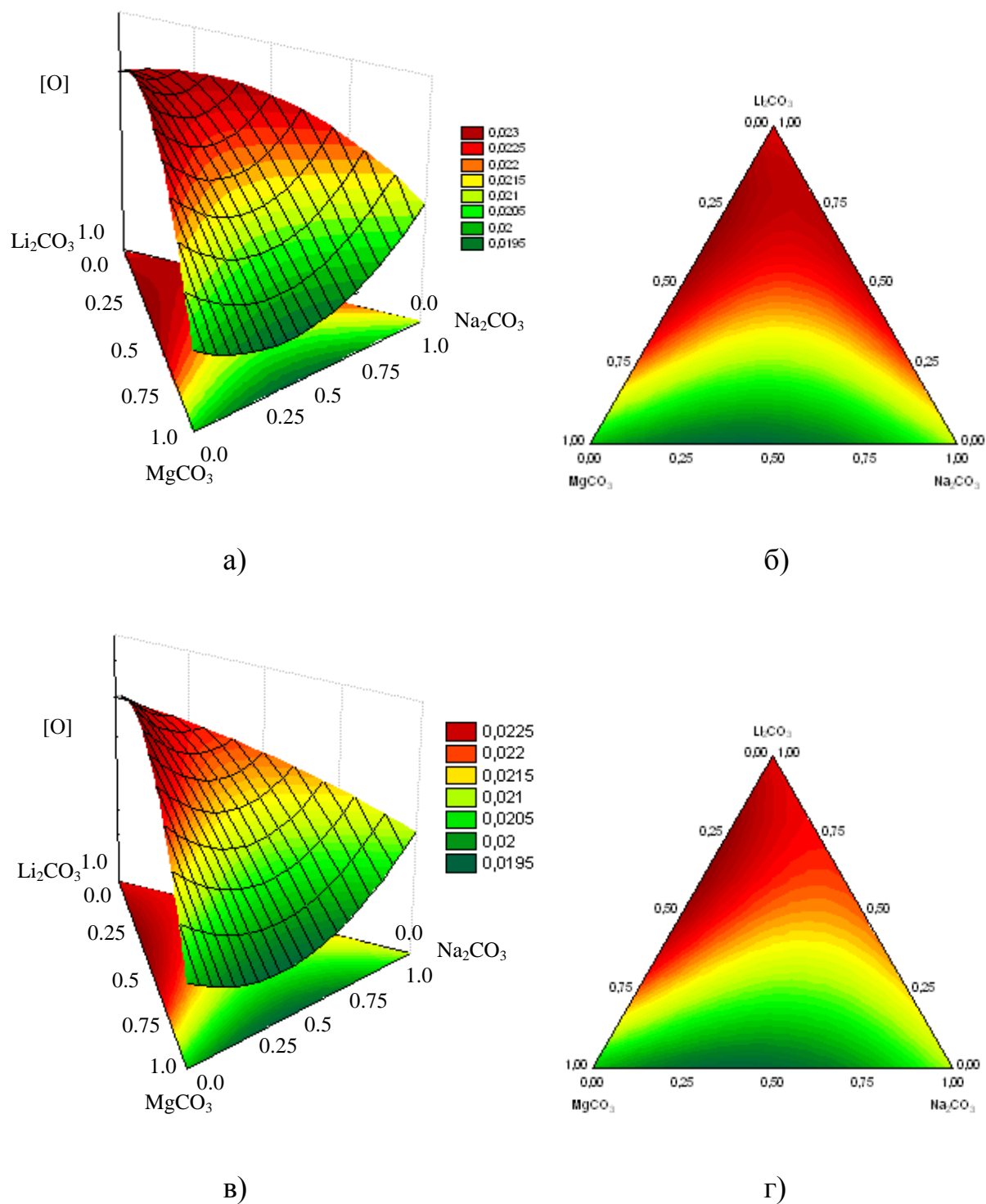
Поверхности отклика получаем при фиксированных значениях  $\text{CaCO}_3$  и изменении трех остальных факторов.

Графическое изображение поверхностей отклика представлено на рис. 4.4 и 4.5.



а - трехмерное изображение ( $\text{CaCO}_3=0,25$ ); б – контурное изображение ( $\text{CaCO}_3=0,25$ )

Рисунок 4.4 – Графические изображения полученной модели



а - трехмерное изображение ( $CaCO_3=0,4$ ); б – контурное изображение ( $CaCO_3=0,4$ ); в - трехмерное изображение ( $CaCO_3=0,5$ ); г – контурное изображение ( $CaCO_3=0,5$ )

Рисунок 4.5 – Графические изображения полученной модели

Анализ графических изображений поверхностей отклика проводился при минимальном содержании кислорода в наплавленном металле  $[O] = 0,020 \dots 0,021 \%$ . Анализ показал, что наиболее эффективные соотношения композиции карбонатов лежат в области:

- при содержании  $\text{CaCO}_3 = 25\%$ , содержание остальных компонентов:  $\text{Li}_2\text{CO}_3 = 13 \dots 17\%$ ,  $\text{MgCO}_3 = 32 \dots 50\%$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 14 \dots 30\%$ ;

- при содержании  $\text{CaCO}_3 = 40\%$ , содержание остальных компонентов:  $\text{Li}_2\text{CO}_3 = 8 \dots 13\%$ ,  $\text{MgCO}_3 = 23 \dots 35\%$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 17 \dots 23\%$ ;

- при содержании  $\text{CaCO}_3 = 50\%$ , содержание остальных компонентов:  $\text{Li}_2\text{CO}_3 = 5 \dots 10\%$ ,  $\text{MgCO}_3 = 10 \dots 25\%$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 20 \dots 35\%$ .

Одинаковое содержание кислорода в наплавленном металле обеспечивается, при возрастании фиксированной величины  $\text{CaCO}_3$ , существенным уменьшением  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$ .

На основе анализа графических зависимостей и литературных данных [4, 6] в качестве наиболее эффективной композиции карбонатов, обеспечивающей низкое содержание кислорода в металле шва и высокие физические и технологические свойства шлаков, принято следующее соотношение композиции карбонатов  $\text{CaCO}_3 = 40\%$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3 = 8 \dots 13\%$ ,  $\text{MgCO}_3 = 23 \dots 35\%$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 17 \dots 23\%$ .

Совместный анализ графических изображений поверхностей отклика двух приведенных математических моделей, отражающих влияние соотношения компонентов композиции карбонатов на содержание азота и кислорода в наплавленном металле показал следующее. Влияние карбонатов кальция и магния на содержание азота и кислорода в наплавленном металле практически одинаково, увеличение одного из карбонатов приводит к пропорциональному уменьшению другого. Максимально эффективное суммарное содержание данных карбонатов в составе композиции карбонатов в обеих моделях составляет в среднем  $55 \dots 70\%$ . В соответствии с ранее приведенными данными оксид кальция, образующийся при диссоциации  $\text{CaCO}_3$ , оказывает более положительное влияние на физические и

технологические свойства шлака, чем оксид магния, образующийся при диссоциации  $MgCO_3$ . Поэтому в разрабатываемой композиции карбонатов на долю  $CaCO_3$  отводится 2/3, а  $MgCO_3$  1/3 их суммарного содержания.

Оставшиеся массовые проценты в композиции карбонатов приходятся на карбонаты лития и натрия.  $Li_2CO_3$  при диссоциации обеспечивает наибольшее выделение углекислого газа, создавая надежную защиту металла от азота, однако при этом способствует насыщению металла шва кислородом.  $Na_2CO_3$  наоборот обеспечивает при диссоциации наименьшее выделение углекислого газа. В связи с этим увеличение его содержания в композиции карбонатов не обеспечивает требуемого эффекта защиты от азота, но при этом металл шва меньше насыщается кислородом. Поэтому для обеспечения минимального содержания и азота, и кислорода в металле шва их соотношение в составе композиции карбонатов принимаем 1:1.

Таким образом, на основе проведенного анализа, в состав наполнителя разрабатываемой СЭПП вводится композиция карбонатов в составе  $CaCO_3 = 40\%$ ,  $Li_2CO_3 = 20\%$ ,  $MgCO_3 = 20\%$ ,  $Na_2CO_3 = 20\%$  [158]. При таком содержании карбонатов приведенные математические модели дают следующие прогнозируемые значения откликов:  $[N] = 0,034\%$ ,  $[O] = 0,0213\%$

#### 4.2 Расчет состава самозащитной порошковой проволоки для наплавки штампового инструмента

Из анализа литературных данных [59, 107, 159 – 161] следует, что коэффициент перехода легирующих элементов при равных прочих условиях, является функцией:

$$\eta = f(C_{ГШ}, K_o, CO_2) \quad (4.3)$$



где  $C_{гш}$  – содержание газошлакообразующих компонентов в проволоке, %;

$K_0$  – основность шлака, рассчитанная по формуле обеспечивающей максимальный коэффициент корреляции зависимости  $\eta = f(K_0)$ ;

$CO_2$  – содержание углекислого газа в проволоке в предположении полного разложения карбонатов, %.

Содержание газошлакообразующих компонентов в порошковой проволоке:

$$C_{гш} = C_{ш} + CO_2,$$

где  $C_{ш}$  – содержание шлакообразующих материалов в шихте проволоки, %

Расчет количества  $CO_2$  производим на основе известного процентного содержания газошлакообразующих компонентов порошковой проволоки  $C_{гш}$ , доли карбонатов в газошлакообразующей части шихты и доли  $CO_2$ , выделяющейся в результате разложения единицы массы карбонатов по методике, приведенной в п. 4.1. Для разрабатываемой СЭПП  $C_{гш} = 8,8 \%$ ,  $C_{ш} = 7,93\%$ ,  $CO_2 = 0,87\%$ .

Для расчета степени основности шлака по его химическому составу предложен ряд формул, из которых максимальный коэффициент корреляции зависимости  $\eta = f(K_0)$  проявляет формула, которая рекомендована для применения Международным институтом сварки:

$$K_0 = \frac{CaO + MgO + BaO + Na_2O + K_2O + CaF_2 + 0.5(MnO + FeO)}{SiO_2 + 0.5(TiO_2 + ZrO_2 + Al_2O_3)} \quad (4.4)$$

Основность шлака, образующегося в процессе наплавки разрабатываемой СЭПП, составляет  $K_0 = 5,3$ .

Обработка экспериментальных данных методом многомерного регрессионного анализа [162, 163] дает зависимости коэффициентов

перехода от состава газшлакообразующих компонентов порошковой проволоки в виде [59]:

$$\eta = b_0 + b_1 C_{ш} + (b_2 + b_3 C_{ш}) \cdot \ln K_0 + (b_4 + b_3 \ln K_0) \cdot CO_2 \quad (4.5)$$

Коэффициенты модели перехода легирующих элементов в зависимости от содержания газшлакообразующих компонентов порошковой проволоки и основности шлака приведены в таблице 4.4 [59].

Таблица 4.4 – Коэффициенты модели

Коэффициент	Коэффициенты модели					
	$\eta_c$	$\eta_{Mn}$	$\eta_{Si}$	$\eta_v$	$\eta_w$	$\eta_{Cr}$
$b_0$	69.5	93.6	81.0	97.3	96.8	99.0
$b_1$	-0.23	-1.86	-1.77	-0.89	-0.38	-0.81
$b_2$	0.71	-0.48	-3.0	-0.002	0	-0.82
$b_3$	0.095	0.225	-0.2	0.087	0	0.134
$b_4$	-3.61	-3.81	-6.8	-3.1	-1.19	-3.38

Используя уравнение (4.5) и данные табл. 4.4, произведен расчет коэффициентов перехода легирующих элементов в зависимости от содержания газшлакообразующих компонентов разрабатываемой порошковой проволоки и основности шлака:  $\eta_c = 0,67$ ,  $\eta_{Mn} = 0,78$ ,  $\eta_{Si} = 0,59$ ,  $\eta_v = 0,89$ ,  $\eta_w = 0,92$ ,  $\eta_{Cr} = 0,9$ .

При разработке порошковой проволоки, используя полученные коэффициенты перехода легирующих элементов, по заданному составу наплавленного металла был рассчитан состав самозащитной экзотермической порошковой проволоки для наплавки штампового инструмента, выполняющего разделительные операции в холодном состоянии марки ППЭН-8ХЗГСВ2Ф, где ЭН означает, что порошковая проволока экзотермическая наплавочная (масс.%):  $C_{ш} = 9\%$ ;  $Q_{э.с} = 14...15\%$ ; FeMn –

1,7...2,0 %; FeTi – 1,1...1,2 %; FeSi – 1,6...1,8%; Cr – 2,9...3,2%; W – 2,2...2,5 %; FeV – 0,7...0,9 %; графит серебристый – 0,9...1,1 %; стальная оболочка – остальное [158, 164].

В составе шихты сердечника СЭПП используются ферросплавы: ферромарганец (85 % Mn), ферросилиций (75 % Si), феррованадий (50 % V), ферротитан (35 % Ti).

#### 4.3 Определение области режимов наплавки самозащитной порошковой проволокой с экзотермической смесью

Применение в качестве экзотермической смеси оксидов железа и алюминия позволяет эффективно управлять скоростью плавления и количеством электродного металла, обеспечивает равномерность плавления оболочки и сердечника самозащитной порошковой проволоки, расширяет диапазон температур и полноту диссоциации газообразующих компонентов сердечника СЭПП, в результате чего следует ожидать повышения эффективности защиты металла от взаимодействия с воздухом в начальной стадии этого процесса.

Определение технологически приемлемой области параметров режима наплавки, обеспечивающей получение максимального значения коэффициента наплавки при минимальных потерях электродного металла, производилось методом математического планирования эксперимента и статистической обработки данных. Исследовалось влияние величины сварочного тока  $I_{св}$ , напряжение на дуге  $U_{д}$ , коэффициента заполнения порошковой проволоки  $K_3$  и соотношения содержания в сердечнике проволоки окалины и алюминиевого порошка  $\beta$  на характеристики плавления порошковых проволок с экзотермической смесью в составе наполнителя: коэффициент наплавки –  $\alpha_n$ , коэффициент расплавления –  $\alpha_p$ , и коэффициент

общих потерь –  $\psi$ .

Для исследований были изготовлены СПП в соответствии с методикой, приведенной в п. 2.2. Содержание экзотермической смеси в шихте наполнителя СПП составляло 40 массовых процентов. Коэффициент заполнения порошковой проволоки  $K_3$  изменялся за счет применения ленты различной ширины, при толщине 0,5 мм.

Для анализа результатов и статистической обработки данных использовалась программа Statistica 6. Данные полученные в результате исследований представлены в виде графиков Statistica 6.

Зависимость функции отклика от независимых переменных  $X_i$  находили в виде полинома второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 \quad (4.73)$$

При статистической обработке данных за основу принят симметричный не композиционный трехуровневый план второго порядка Бокса – Бенкена [165]. Эти планы позволяют получать максимальное количество объективной информации о влиянии изучаемых факторов на процесс с помощью наименьшего числа опытов. Они представляют собой сочетание двухуровневого  $(-1, +1)$  полного факторного эксперимента с неполно-блочным сбалансированным планом. Область планирования - гиперкуб, причем каждый из факторов принимает значения на трех уровнях: 1, 0 и 1.

Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 4.5.

Результаты исследования приведены в таблице В1 (приложение В).

Величина значимости при проверке адекватности данной модели  $p=0,047$ , следовательно полученная модель адекватна с уровнем доверия 95.3 %.

Таблица 4.5 – Матрица планирования эксперимента

Уровень факторов и интервал варьирования	Изменяемые параметры			
	I <sub>св</sub> , А	U <sub>д</sub> , В	Отношение Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al=β	K <sub>з</sub> , %
Нулевой уровень x=0	400	30	4	37
Интервал варьирования	50	2	1	3
Нижний уровень, x=-1	450	28	3	34
Верхний уровень, x= + 1	350	32	5	40
Кодовое обозначение переменных	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>

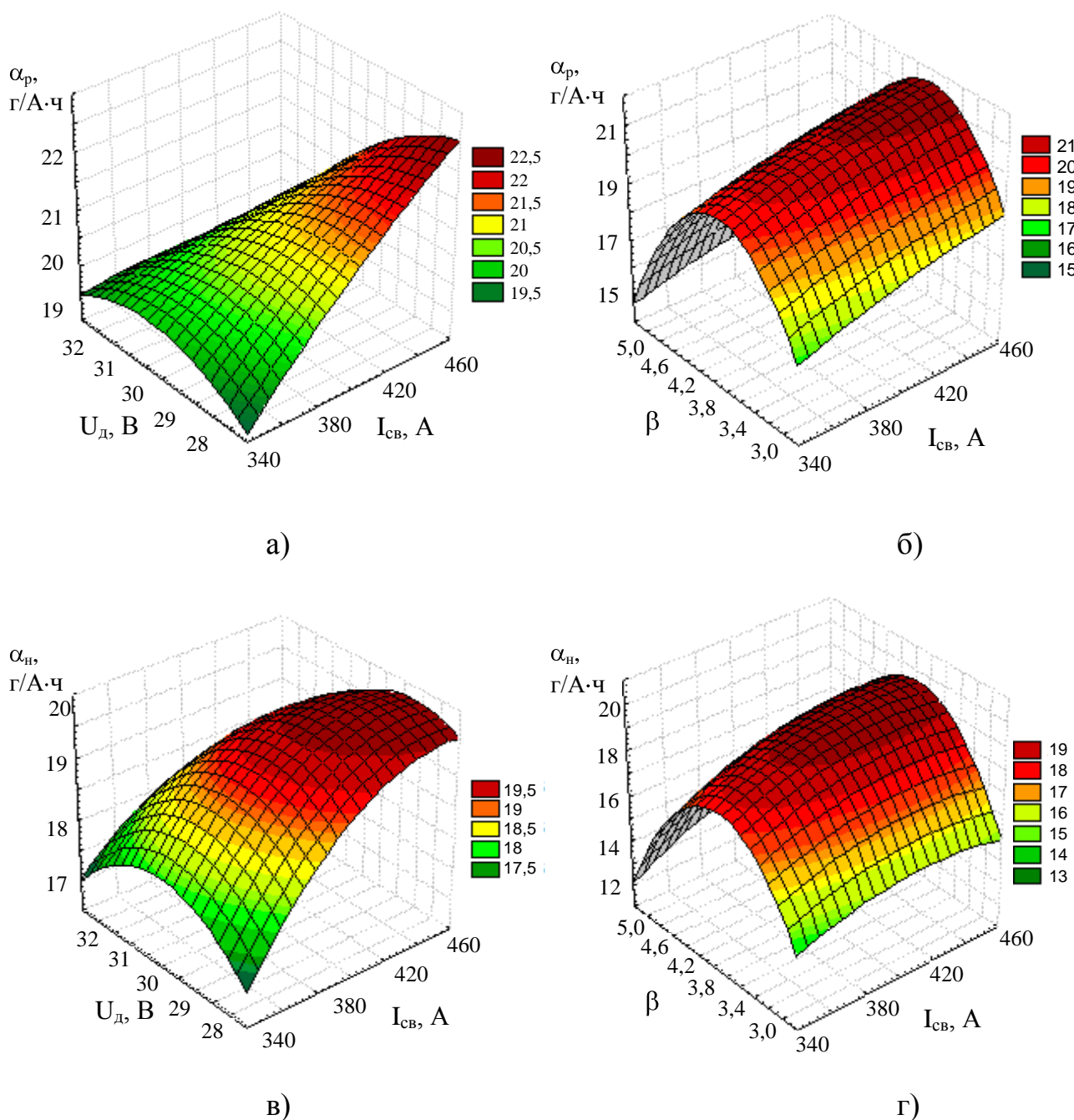
С учетом значимости коэффициентов модели для всех факторов математическое описание поверхности отклика следующее:

$$\alpha_p = -168,72 + 0,201 I_{св} + 7,135 U_d + 18,64 \beta + 0,231 K_3 - 0,006 U_d I_{св} + 0,12 K_3 I_{св} + 0,1375 \beta U_d - 0,055 \beta K_3 - 0,000058 I_{св}^2 - 0,093 U_d^2 - 2,89 \beta^2$$

$$\alpha_H = -184,11 + 0,242 I_{св} + 8,608 U_d + 14,575 \beta + 0,135 K_3 + 0,0065 \beta I_{св} + 0,0024 K_3 I_{св} + 0,295 \beta U_d - 0,0024 U_d K_3 - 0,000205 I_{св}^2 - 0,146 U_d^2 - 3,315 \beta^2$$

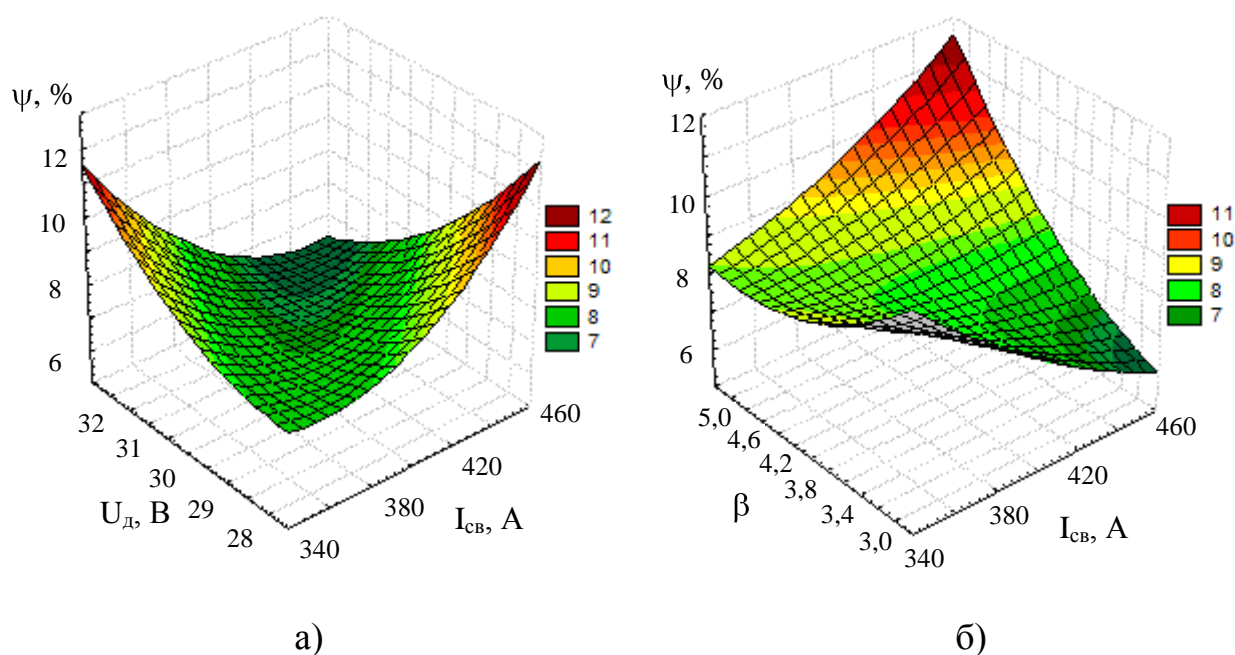
$$\Psi = -17,75 + 0,191 I_{св} - 2,138 U_d + 9,025 \beta - 2,125 K_3 - 0,0147 U_d I_{св} + 0,0275 \beta I_{св} - 0,81 U_d \beta + 0,0963 U_d K_3 + 0,000124 I_{св}^2 + 0,183 U^2 + 0,6165 \beta^2$$

Графическое изображение поверхностей отклика представлено на рис. 4.6 и 4.7.



а – зависимость  $\alpha_p$  от  $U_d$  и  $I_{\text{св}}$ ; б – зависимость  $\alpha_p$  от  $\beta$  и  $I_{\text{св}}$ ; в - зависимость  $\alpha_n$  от  $U_d$  и  $I_{\text{св}}$ ; г – зависимость  $\alpha_n$  от  $\beta$  и  $I_{\text{св}}$

Рисунок 4.6 – Графические зависимости  $\alpha_p$  и  $\alpha_n$  от величин сварочного тока  $I_{\text{св}}$ , напряжения на дуге  $U_d$  и соотношения окалины и алюминиевого порошка  $\beta$



а - зависимость  $\psi$  от  $U_d$  и  $I_{св}$ ; б – зависимость  $\psi$  от  $\beta$  и  $I_{св}$

Рисунок 4.7 – Графические зависимости  $\psi$  от величин сварочного тока  $I_{св}$ , напряжения на дуге  $U_d$  и соотношения окалины и алюминиевого порошка  $\beta$

Анализ полученных регрессионных и графических зависимостей, построенных по результатам расчетов показал увеличение коэффициента расплавления  $\alpha_p$  с ростом  $I_{св}$  (рис. 4.6, а), что связано с повышением производительности процесса наплавки, и уменьшение  $\alpha_p$  с увеличением  $U_d$ , при росте которого увеличиваются потери электродного металла на разбрызгивание. При увеличении соотношения содержания окалины и алюминиевого порошка  $\beta$  в составе шихты сердечника порошковой проволоки наблюдается экстремальное изменение  $\alpha_p$  во всем диапазоне величин сварочного тока (рис. 4.6, б). Это объясняется тем, что увеличение содержания окалины, при достаточном количестве раскислителя – алюминия, приводит к повышению количества выделяемого тепла в результате протекания экзотермической реакции и повышению количества

восстановленного железа. Максимальное значение  $\alpha_p$  получено при  $\beta = 4$ . Дальнейшее уменьшение  $\alpha_p$  связано со снижением скорости расплавления порошковой проволоки, что обусловлено наличием значительного количества окислы без достаточного количества раскислителя.

Влияние величины сварочного тока  $I_{св}$ , напряжения на дуге  $U_d$  и соотношения окислы и алюминиевого порошка  $\beta$  на коэффициент наплавки  $\alpha_n$  (рис. 4.6, в, г) аналогично их влиянию на коэффициент расплавления  $\alpha_p$ . Большой градиент  $\alpha_n$ , по сравнению с  $\alpha_p$ , при средних значениях тока и напряжения связан с уменьшением потерь электродного металла на угар и разбрызгивание.

Коэффициент общих потерь  $\Psi$  увеличивается с увеличением  $I_{св}$  при малых значениях  $U_d$  (рис. 4.7, а). Это связано с тем, что при малой тепловой мощности дуги не происходит заметное развитие экзотермической реакции, а только незначительно улучшается равномерность плавления сердечника и оболочки порошковой проволоки. Увеличение тока приводит к повышению потерь электродного металла на угар, а следовательно и общих потерь  $\Psi$ . Увеличение коэффициента общих потерь  $\Psi$  с ростом напряжения  $U_d$ , при низких значениях сварочного тока  $I_{св}$  (рис. 4.7, а), также связано с малой тепловой мощностью дуги и увеличением потерь на разбрызгивание с возрастанием напряжения.

Увеличение  $U_d$  при высоких значениях  $I_{св}$  и повышение  $I_{св}$  при высоком  $U_d$  приводит к уменьшению коэффициента общих потерь в связи с более интенсивным протеканием экзотермической реакции на торце самозащитной порошковой проволоки и стадии капли, что интенсифицирует и способствует более полной диссоциации карбонатов до попадания в каплю и сварочную ванну, усиливает протекание восстановительных реакций и улучшает защиту зоны дугового разряда. При этом дуговой разряд протекает более стабильно, без взрывного отделения электродных капель.

Уменьшение коэффициента общих потерь  $\Psi$  при увеличении



соотношения окалины и алюминия  $\beta$ , при малых значениях  $I_{св}$  (рис. 4.7, б), связано с повышением количества выделяемого тепла в результате протекания экзотермической реакции. При этом дуговой разряд протекает более стабильно, без взрывного отделения электродных капель. Увеличение  $\Psi$  с увеличением  $\beta$ , при больших значениях  $I_{св}$ , обусловлено значительным увеличением тепловой мощности, и связанным с этим интенсивным испарением электродного металла.

Таким образом, исходя из анализа уравнений регрессии и рис. 4.6 и 4.7 наиболее приемлемыми являются следующие параметры режима наплавки:  $I_{св}=380\dots400$  А,  $U_{д}=29\dots30$  В,  $\beta=4$ ,  $K_3=37\%$ . При наплавке на данном режиме достигнуты следующие значения показателей плавления самозащитной экзотермической порошковой проволоки:  $\alpha_p=19,5\dots21$  г/А·ч;  $\alpha_n=18\dots19$  г/А·ч;  $\Psi =7\dots8$  %.

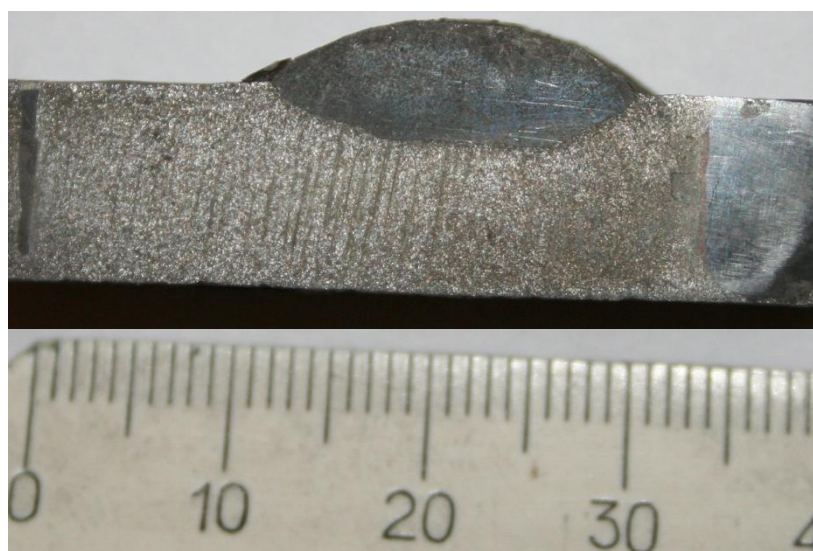
#### 4.4 Влияние экзотермической смеси на параметры сварного шва

Для изучения влияния экзотермической смеси в составе шихты сердечника СПП на параметры сварных швов были изготовлены самозащитные порошковые проволоки по методике, изложенной в п. 2.2, с экзотермической смесью окалина-алюминий, при их соотношении  $\beta=4$ , и смесью железного и алюминиевого порошков. Содержание экзотермической смеси и смеси железного и алюминиевого порошков в шихте наполнителя СПП составляло 40 массовых процентов. Однопроходная наплавка валиков на пластины из низкоуглеродистой стали ВСт3пс размером  $10\times100\times200$  мм выполнялась на режиме  $I_{св} = 380\dots400$  А,  $U_{д} = 29\dots30$  В,  $V_{св} = 19,3$  м/ч.

Вид поперечных сечений наплавленных валиков приведены на рис. 4.8.



а)



б)

а – валик наплавленный СПП, содержащей смесь железного и алюминиевого порошков; б – валик наплавленный СПП, содержащей экзотермическую смесь

Рисунок 4.8 – Виды поперечных сечений наплавленных валиков

Результаты измерения размеров наплавленного валика при наплавке СПП с экзотермической смесью и смесью железного и алюминиевого порошков приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты изменения размеров наплавленных валиков

№ п/п	Самозащитная порошковая проволока	Размеры валиков, мм			Показатель качества формирования наплавленного металла $K_v$
		усиление А, мм	ширина В, мм	Глубина проплавления, мм	
1	со смесью железного и алюминиевого порошков	2,7	18,0	4,0	3,0
2	с экзотермической смесью	3,5	19,5	2,6	10,1

Как видно из данных табл. 4.6 введение экзотермической смеси в состав шихты порошковой проволоки приводит к увеличению высоты усиления и ширины наплавленного валика. Рост этих параметров обусловлен тем, что для обеспечения заданных параметров режима наплавки, при наплавке СПП с экзотермической смесью по сравнению с СПП со смесью железного и алюминиевого порошков, увеличивалась скорость подачи порошковой проволоки. Это приводит к возрастанию коэффициентов расплавления и наплавки, а следовательно и к увеличению площади наплавки при постоянных значениях сварочного тока и скорости сварки.

При наплавке СПП с экзотермической смесью, по сравнению с наплавкой СПП со смесью железного и алюминиевого порошков, наблюдается уменьшение глубины проплавления. Это связано с тем, что доля тепла экзотермической реакции, в сравнении с тепловой мощностью дуги, мала и не создаёт дополнительного давления на жидкую сварочную ванну. Однако при этом возрастает общая тепловая мощность, что является причиной увеличения жидкой прослойки. Это приводит к уменьшению теплопередачи от дуги к основному металлу через прослойку жидкого металла в сварочной ванне, а следовательно и к уменьшению глубины проплавления.

Таким образом, введение экзотермической смеси в состав шихты сердечника СПП приводит к увеличению ширины и высоты усиления наплавленного валика, и уменьшению глубины проплавления, что важно при процессах наплавки.

Для оценки качества формирования наплавленного металла используется методика, приведенная в п. 2.5. Результаты измерений и расчеты по формуле (2.18) показали, что показатель качества формирования наплавленного металла при наплавке СПП с экзотермической смесью составляет  $K_v = 10,1$ , тогда как при наплавке СПП без экзотермической смеси  $K_v = 3,0$ . Следовательно, введение в состав шихты сердечника СПП экзотермической смеси повышает качество формирования наплавленного металла в 3...4 раза.

#### Выводы по разделу 4

1. Установлено, что при разработке самозащитной экзотермической порошковой проволоки, обеспечивающей получение износостойкого наплавленного металла, в связи с увеличением объема металлической составляющей вводимых компонентов шихты, требуется уменьшение количества, а следовательно и усовершенствование состава газошлаковой составляющей наполнителя проволоки. Решение этой задачи достигается за счет использования в сердечнике порошковых проволок композиции карбонатов щелочных и щелочноземельных металлов в количестве не более 9 %.

2. На основании анализа температур диссоциации и расчета объема  $\text{CO}_2$ , выделяющегося при диссоциации применяемых карбонатов металлов, в качестве газообразующего компонента наполнителей СПП, объектом исследования принята композиция карбонатов  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,

$\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Принятое сочетание карбонатов обеспечивает выделение  $\text{CO}_2$  в интервале температур от 400 °С до 1200 °С.

3. Применение методов математического планирования эксперимента позволило получить математические модели, отражающие влияние соотношения компонентов композиции карбонатов на содержание азота и кислорода в наплавленном металле. Установлено, что наиболее эффективный состав композиции карбонатов газообразующей части наполнителя СЭПП:  $\text{CaCO}_3 = 38...42\%$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3 = 12...25\%$ ,  $\text{MgCO}_3 = 20...25\%$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 17...23\%$ , при котором в наплавленном металле содержание азота  $[\text{N}] \leq 0,034\%$  и кислорода  $[\text{O}] \leq 0,0213\%$ .

4. Используя известные уравнения, рассчитаны коэффициенты перехода легирующих элементов в зависимости от содержания газошлакообразующих компонентов порошковой проволоки и основности шлака, что позволило получить состав СЭПП для наплавки штампового инструмента выполняющего разделительные операции в холодном состоянии марки ППЭН-8ХЗГСВ2Ф (масс.%):  $\text{C}_{\text{гш}} - 9\%$ ;  $\text{Q}_{\text{э.с}} - 14...15 \%$ ;  $\text{FeMn} - 1,7...2,0 \%$ ;  $\text{FeTi} - 1,1...1,2 \%$ ;  $\text{FeSi} - 1,6...1,8\%$ ;  $\text{Cr} - 2,9...3,2\%$ ;  $\text{W} - 2,2...2,5 \%$ ;  $\text{FeV} - 0,7...0,9 \%$ ; графит серебристый – 0,9...1,1 %; стальная оболочка – остальное.

5. Применение методов статистической обработки результатов эксперимента позволило установить технологически приемлемую область параметров режима наплавки:  $I_{\text{св}}=380...400 \text{ А}$ ,  $U_{\text{д}}=29...30 \text{ В}$ ,  $\beta=4$ ,  $K_3=37\%$ , обеспечивающую показатели плавления СЭПП:  $\alpha_{\text{р}}=19,5...21 \text{ г/А}\cdot\text{ч}$ ;  $\alpha_{\text{н}}=18...19 \text{ г/А}\cdot\text{ч}$ ;  $\Psi = 7...8 \%$ .

6. Введение экзотермической смеси в состав шихты сердечника СПП приводит к увеличению ширины наплавленного валика на 8...10 %, высоты усиления – на 25...30 % и уменьшению глубины проплавления на 32...37 %.

## РАЗДЕЛ 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К НАПЛАВКЕ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА

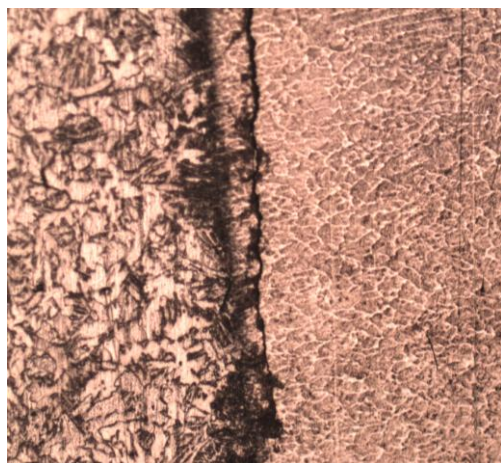
5.1 Расчет температуры предварительного подогрева при наплавке штампов холодной деформации металла

Анализ характера разрушения и причин выхода из строя штампового инструмента, работающего в холодном состоянии показал, что наиболее часто встречается скалывание рабочей поверхности [78, 166]. Причиной сколов является образование сетки трещин, а также высокая твердость при низком значении ударной вязкости. Известно, что при наплавке штампового инструмента сложнелегированными сплавами наиболее опасными дефектами являются горячие и холодные трещины в наплавленном металле (рис. 5.1, а) и холодные трещины в зоне сплавления, способствующие скалыванию рабочих кромок матриц и пуансонов (рис. 5.1, б, в) [78].

Основным средством предотвращения обеих видов трещин в этих наплавках является предварительный подогрев и снижение скорости охлаждения.

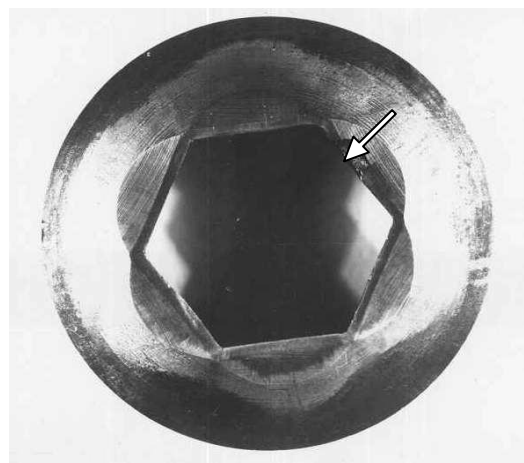
Температуру предварительного подогрева, обеспечивающую необходимую скорость охлаждения, можно определить, используя формулу для расчета скорости охлаждения металла. Известно, что скорость охлаждения металла при наплавке валика на массивное тело определяется по формуле [4, 167]:

$$W_{охл1} = - \frac{2\pi\lambda(T - T_0)'}{q_u / V_{св}} \quad (5.1)$$

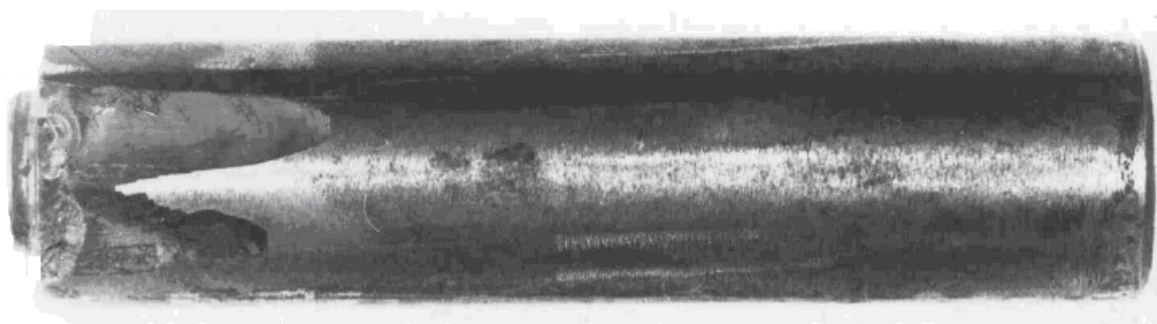


x 100

а)



б)



в)



г)

а – трещины в наплавленном металле, х 100; б – выкрашивание рабочих кромок матрицы; в – скалывание рабочих кромок пуансона; г – налипание штампуемого метала на рабочую поверхность пуансона

Рисунок 5.1 – Трещины в наплавленном металле и виды износа инструмента

где  $W_{\text{охл1}}$  – скорость охлаждения металла при наплавке порошковой проволокой, °C/с;

$\omega$  – коэффициент усреднения;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Дж/см·с·град;

$T$  – температура точек тела при наплавке валика на массивное тело, °C;

$T_0'$  – температура предварительного подогрева при наплавке порошковой проволокой, °C;

$q_u$  – тепловая мощность нагрева изделия, Вт;

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

Учитывая ранее установленный (раздел 2) эффект дополнительного тепловложения от экзотермической реакции, скорость охлаждения металла при наплавке валика на массивное тело экзотермической порошковой проволокой определяется по формуле:

$$W_{\text{охл2}} = - \frac{2\pi\lambda(T - T_0'')^2}{(q_u + q_{\text{э.с}})/V_{\text{св}}} \quad (5.2)$$

где  $W_{\text{охл2}}$  – скорость охлаждения металла при наплавке порошковой проволокой, содержащей экзотермическую смесь, °C/с;

$T_0''$  – температура предварительного подогрева при наплавке порошковой проволокой, содержащей экзотермическую смесь, °C;

$q_{\text{э.с}}$  – тепловая мощность, выделяемая в результате протекания экзотермической реакции, Вт.

Тепловая мощность нагрева изделия определяется по формуле [4, 167]:

$$q_u = \eta_u \cdot I_{\text{св}} \cdot U_{\text{д}} \quad (5.3)$$



где  $\eta_u$  – эффективный КПД нагрева.

Согласно данным [4] эффективный КПД нагрева при наплавке порошковой проволокой составляет  $\eta_u = 0,8 - 0,9$ .

Приравняв скорости охлаждения металла при наплавке порошковой проволокой без экзотермической смеси и порошковой проволокой, содержащей экзотермическую смесь, получаем равенство:

$$\frac{2\pi\lambda(T - T_0')^2}{q_u / V_{св}} = \frac{2\pi\lambda(T - T_0'')^2}{(q_u + q_{э.с}) / V_{св}}$$

Сделав соответствующие преобразования, получаем формулу для определения температуры предварительного подогрева при наплавке экзотермической порошковой проволокой:

$$T_0'' = T \left(1 - \sqrt{1 + \frac{q_{э.с}}{q_u}}\right) + T_0' \sqrt{1 + \frac{q_{э.с}}{q_u}} \quad (5.4)$$

При наплавке самозащитными экзотермическими порошковыми проволоками на режимах:  $I_{СВ} = 380 \dots 400$  А,  $U_D = 29 \dots 30$  В,  $V_{СВ} = 19,3$  м/ч отношение тепловой мощности, выделяемой в результате протекания экзотермической реакции  $q_{э.с}$ , к тепловой мощности нагрева изделия  $q_u$ , при изменении количества экзотермической смеси в составе сердечника СЭПП от 10 % до 50 %, находится в пределах от 0,02 до 0,12 соответственно.

Используя формулу (5.4) были построены графики зависимости температуры предварительного подогрева при наплавке СЭПП от соотношения мощностей  $q_{э.с}/q_u$  для различных температур предварительного подогрева при наплавке порошковой проволокой, не содержащей экзотермической смеси, полученных в работе [168] и принятых в расчете за исходные.

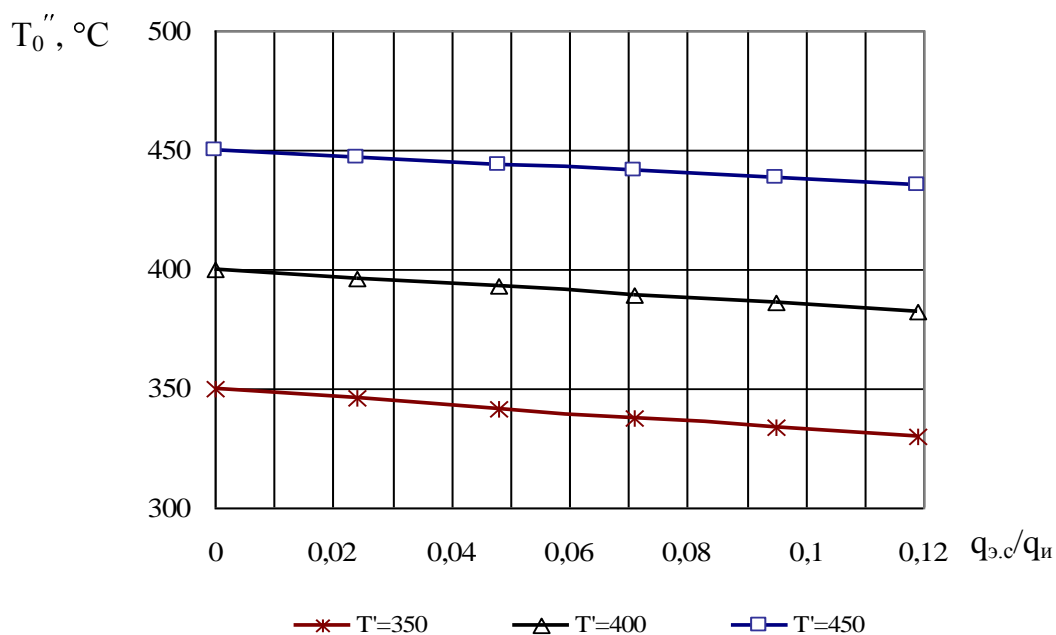


Рисунок 5.2 – График зависимости температур предварительного подогрева от соотношения тепловых мощностей  $q_{э.с}/q_{и}$

С увеличением соотношения тепловых мощностей  $q_{э.с}/q_{и}$ , то есть с увеличением содержания экзотермической смеси в составе шихты сердечника самозащитной порошковой проволоки, температура предварительного подогрева уменьшается (рис. 5.2), что связано с выделением дополнительного тепла и соответственно увеличением температуры нагрева металла в результате протекания экзотермической реакции.

## 5.2 Исследования влияния экзотермической смеси на неметаллические включения и структуру наплавленного металла

Для исследования влияния экзотермической смеси на структуру наплавленного металла по методике, приведенной в п. 2.2, были изготовлены

самозащитные порошковые проволоки с экзотермической смесью окалина-алюминий и смесью железного и алюминиевого порошков. Содержание экзотермической смеси и смеси железного и алюминиевого порошков в шихте сердечника СПП составляло 40 массовых процентов.

Выполнялась наплавка валиков на пластины из стали 45 размером 10×50×200 мм на режиме  $I_{CB} = 380...400$  А,  $U_d = 29...30$  В,  $V_{CB} = 19,3$  м/ч. Пластины предварительно подогревались до температуры 200 °С, а после наплавки охлаждались под слоем флюса.

После наплавки исследовали влияние состава СПП на состав и структуру наплавленного металла.

Определение химического состава металла, наплавленного изготовленными порошковыми проволоками, производили по методике, изложенной в п. 2.6. Результаты анализа химического состава наплавленного металла приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Химический состав наплавленного металла

СПП	Содержание элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Al	V	W
С экзотермической смесью	0,768	0,828	1,083	2,69	0,226	0,239	2,15
Без экзотермической смеси	0.891	1,06	1,31	2,73	0,41	0.247	1,97

Как видно из табл. 5.1 химический состав металла, наплавленного экспериментальными самозащитными порошковыми проволоками соответствует стали 8Х3ГСВ2Ф. При наплавке СПП с экзотермической смесью содержание кремния, марганца и углерода в наплавленном металле меньше, по сравнению с их содержанием при наплавке СПП без экзотермической смеси. Это обусловлено тем, что алюминий, вводимый в состав шихты обеих порошковых проволок в одинаковых количествах, в СЭПП участвует в экзотермической реакции, тогда как в СПП без

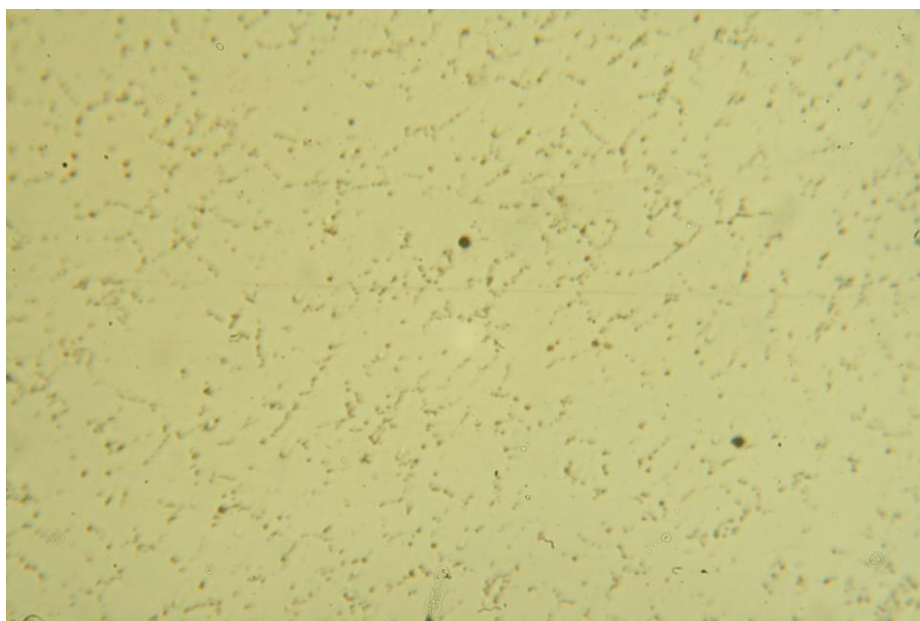
экзотермической смеси он является основным раскислителем и препятствует выгоранию других элементов.

Анализ наплавленного металла для выявления неметаллических включений выполнялся на нетравленных шлифах в соответствии с методикой, приведенной в п. 2.6. Результаты исследования наплавленного металла на неметаллические включения приведены на рис. 5.3.

Исследования показали, что неметаллические включения в металле, наплавленном СПП без экзотермической смеси (рис. 5.3, а) частично расположены по зерну, с преобладанием расположения по его границам. Присутствует большое количество включений вытянутой формы, которые снижают механические свойства наплавленного металла. Содержание неметаллических включений в наплавленном металле составляет 0,046...0,049 %.

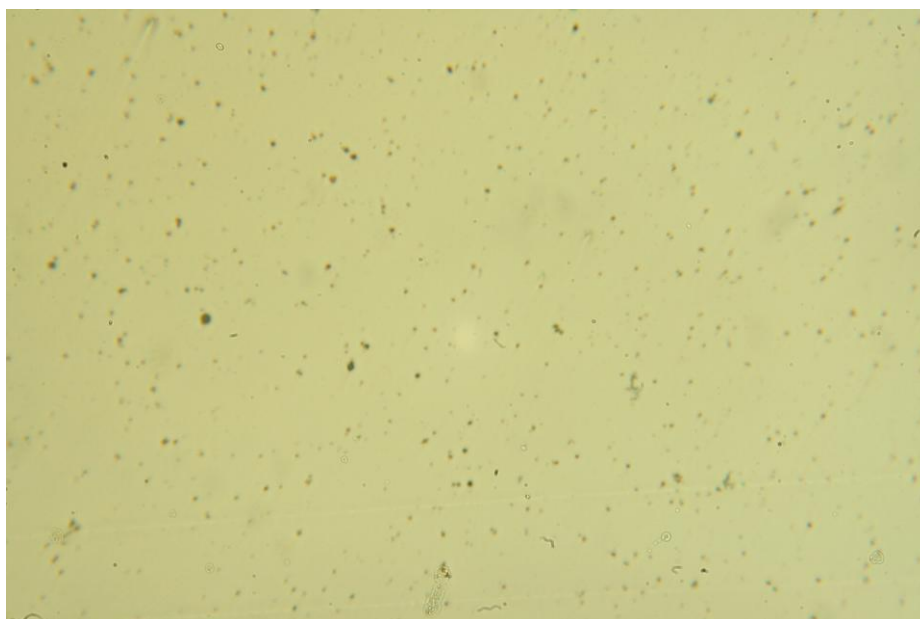
Введение в состав СПП экзотермической смеси уменьшает количество неметаллических включений (рис. 5.3, б), а также количество включений вытянутой формы. Значительно чище границы зерна, включения расположены в основном по зерну. Содержание неметаллических включений в наплавленном металле составляет 0,028...0,03 %. Снижение содержания неметаллических включений связано, в том числе, с изменением физических свойств шлака. Повышение вязкости шлака при наплавке СЭПП приводит к тому, что неметаллические включения, всплывающие на поверхность раздела металл – шлак, поглощаются последним.

Более низкая вязкость шлаков, при наплавке СПП без экзотермической смеси, способствует тому, что неметаллические включения, вышедшие на границу металл – шлак, снова уходят вглубь металла. Таким образом, введение экзотермической смеси в состав шихты сердечника СПП, приводит к снижению содержания количества неметаллических включений и их общей площади.



x 300

а)



x 300

б)

а – наплавка СПП со смесью железного и алюминиевого порошков; б –  
наплавка СПП с экзотермической смесью

Рисунок 5.3 – Неметаллические включения в наплавленном металле

Исследования структуры наплавленного металла производили с использованием системы анализа изображений макро - и микроструктуры материалов SIAMS 700 по методике, изложенной в п. 2.6.

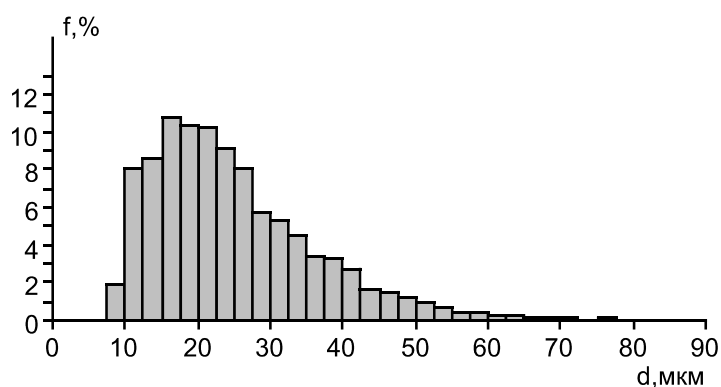
Результаты исследования величины зерна аустенита наплавленного металла непосредственно после наплавки приведены в табл. 5.2 и на рис. 5.4 и рис 5.5.

Таблица 5.2 - Результаты анализа величины зерна аустенита

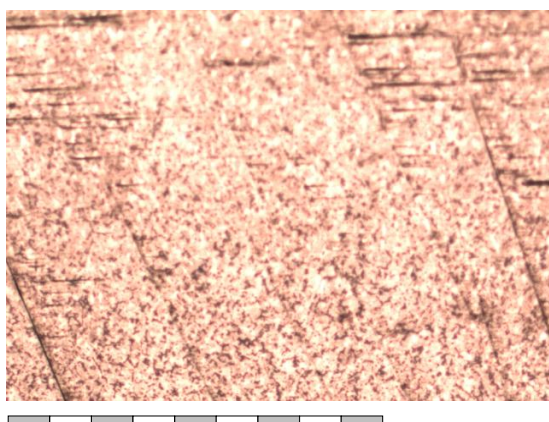
Результаты анализа	наплавка СПП без экзотермической смеси	наплавка СПП с экзотермической смесью
Число полей зрения	1	1
Общая площадь анализа, мм <sup>2</sup>	5.1	1.3
Число зерен	6827	5371
Средняя площадь зерна, мкм <sup>2</sup>	750.9	233.5
Площадь наибольшего зерна, мкм <sup>2</sup>	7985.7	4434.0
Номер зерна		
Стандарт	ГОСТ 5639 - 82	
Номер - среднее значение	7.4	9.1
Доверительный интервал (95% CI)	0.03	0.03
Относительная погрешность (%RA)	0.4	0.4
Номер наибольшего зерна	4.0	4.9
Номер - минимальное значение	4	5
Номер - максимальное значение	10	12
Номер по наибольшей доле	7	9
Размер зерна		
Минимальный размер, мкм	9	4.6
Максимальный размер, мкм	89	66.6
Средний размер, мкм	24.9	13.73

Анализ данных, приведенных в табл. 5.2 и на рис. 5.4 и 5.5, показал, что введение экзотермической смеси в состав шихты сердечника СПП приводит к уменьшению размера зерна аустенита и увеличению доли зерен с

большим номером. Это обусловлено увеличением в структуре наплавленного металла микроскопических включений оксида  $Al_2O_3$ , образующегося в результате экзотермической реакции, равномерно распределенных в металле, которые становятся дополнительными центрами кристаллизации и способствуют измельчению структуры.



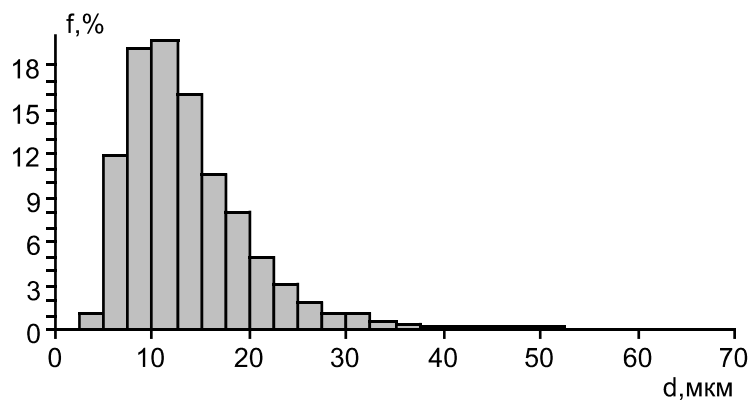
а)



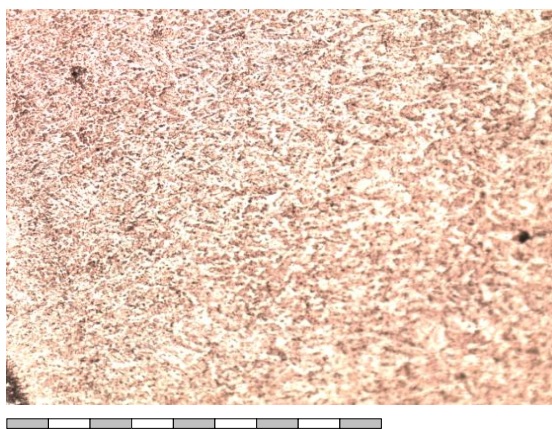
б)

а – распределение размеров зерен; б – анализируемая структура наплавленного металла

Рисунок 5.4 – Результаты анализа величины зерна аустенита при наплавке СПП без экзотермической смеси



а)



б)

а – распределение размеров зерен; б – анализируемая структура  
наплавленного металла

Рисунок 5.5 – Результаты анализа величины зерна аустенита при наплавке СПП с экзотермической смесью

Согласно данным [169, 170] наибольшее влияние величина зерна оказывает на ударную вязкость стали. Определение величины ударной вязкости в зависимости от размера зерна производили по уравнению [169]:

$$KCU = -42361D^2 + 767.36D + 41.921 \quad (5.5)$$



где КСУ – ударная вязкость, Дж/см<sup>2</sup>;

D – средний диаметр зерна, мм.

Используя формулу (5.5) и результаты экспериментального исследования величины зерна аустенита, был построен график зависимости величины ударной вязкости от среднего диаметра зерна, приведенный на рис. 5.6.

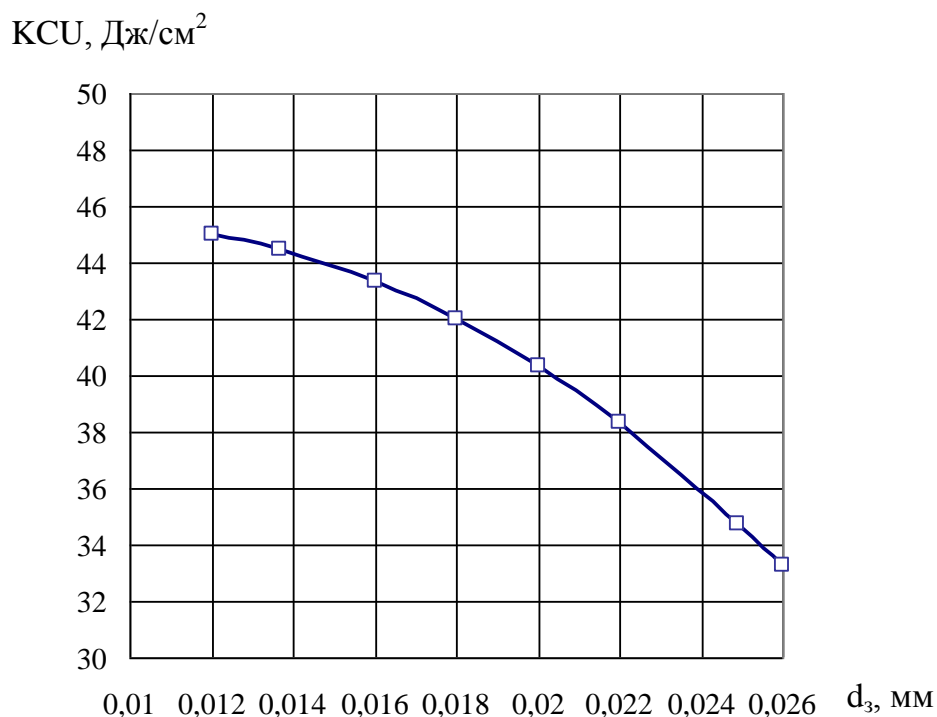
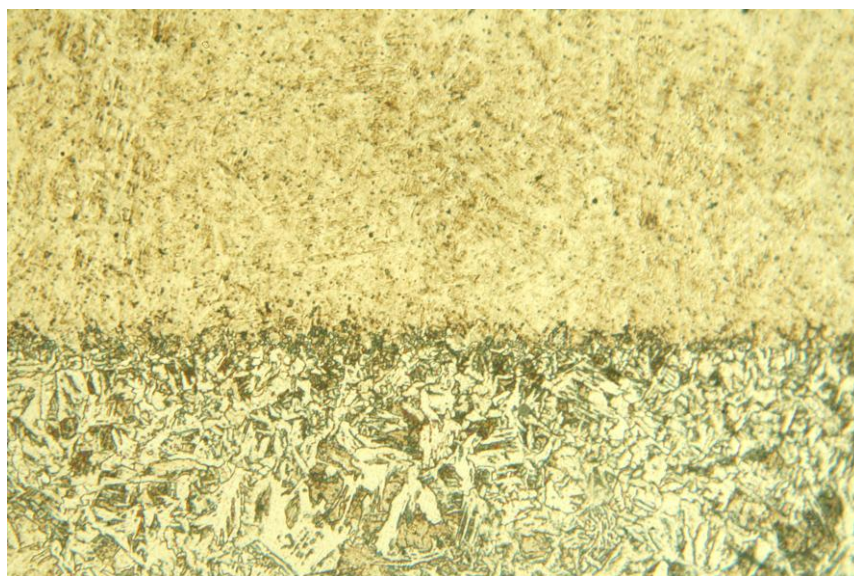


Рисунок 5.6 - График зависимости величины ударной вязкости от среднего диаметра зерна

Анализ результатов расчета и рис. 5.6 показал, что с уменьшением размера зерна ударная вязкость увеличивается. Известно, что ударная вязкость характеризует сопротивление материалов локальным пластическим деформациям, которые сосредоточены в небольших объемах около концентраторов напряжения. Мелкое зерно уменьшает неоднородность распределения деформации в микрообъемах структурных составляющих, что приводит к повышению ударной вязкости [169].

Таким образом, введение экзотермической смеси в состав шихты сердечника СПП, при наплавке которой образуется более мелкозернистая структура, приводит к повышению ударной вязкости наплавленного металла. Согласно результатам расчета ударная вязкость возрастает на 30 %.

Структура зоны сплавления при наплавке СПП с экзотермической смесью показана на рис. 5.7.

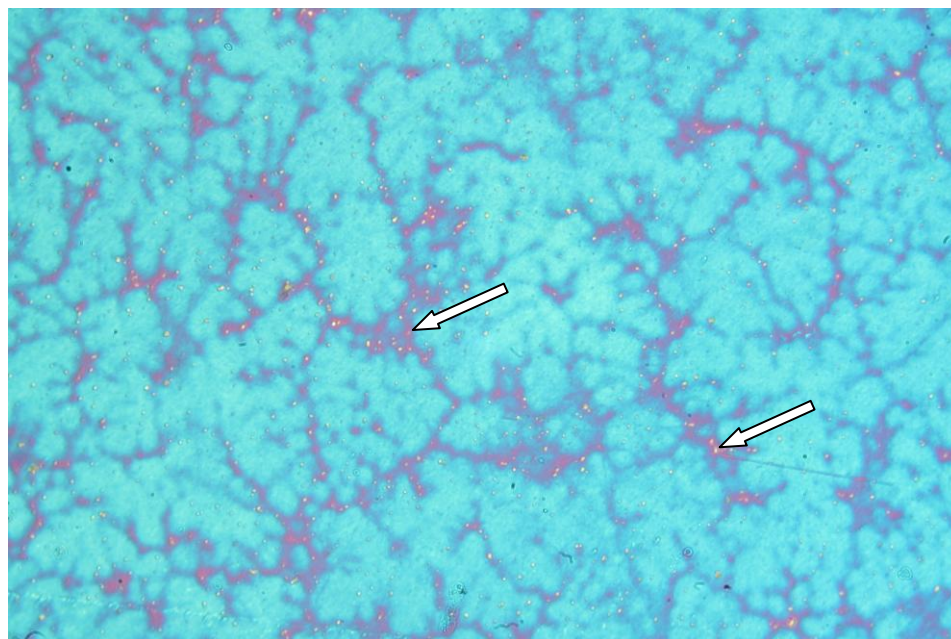


x 100

Рисунок 5.7 – Структура зоны сплавления при наплавке СПП с экзотермической смесью

Структура основного металла, расположенная в нижней части рис. 5.7, состоит из феррита (светлая составляющая) и перлита (темная составляющая) между зернами феррита. Структура наплавленного металла, расположенная в верхней части рисунка, состоит преимущественно из мартенсита, уменьшенного количества остаточного аустенита и равномерно распределенных карбидов. Карбидная фаза наплавленного металла – мелкодисперсная, изредка обнаруживаются карбидные цепочки по границе зерна (рис. 5.8).

Согласно результатам исследований содержание карбидной фазы в наплавленном металле составляет 9,4...10,4 %.



x 300

Рисунок 5.8 – Структура наплавленного металла с карбидной фазой

В зоне сплавления образуется легированный аустенит, который при охлаждении на воздухе превращается в легированный перлит. Измерения микротвердости показали, что легированный перлит неоднородный, он содержит избыточный феррит и карбиды. Такая переходная структура является достаточно прочной после закалки в масле, когда превращается в бейнит и мартенсит и должна обеспечить необходимое сцепление наплавленного металла с основным металлом.

Закалка с последующим низким отпуском наплавленного инструмента улучшает структуру и свойства металла наплавки. Для изучения структуры наплавленного металла и зоны сплавления после термообработки изготавливали образцы после наплавки СПП, приведенных выше составов.

Нагрев под закалку проводили в электрической печи до температуры 900 °С, выдерживали в течение одного часа, затем охлаждали в машинном

масле марки И 20 до температуры 40...20 °С. Закалённые образцы подвергали отпуску при 250 °С в течение двух часов, затем охлаждали на воздухе. После закалки, а также после закалки с отпуском определяли твердость по методу Роквелла с помощью прибора ТК-2.

Результаты замеров твердости приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты замеров твердости образцов, наплавленных исследуемыми проволоками

СПП	Твердость образцов, HRC	
	после закалки	после отпуска
С экзотермической смесью	57...59	58...59
Без экзотермической смеси	54...56	55...56

Как следует из табл. 5.3 значения твердости после закалки и после отпуска имеют практически одинаковые значения. Это обусловлено тем, что после низкого отпуска снимаются напряжения, а заметные структурные превращения, связанные с распадом мартенсита и остаточного аустенита, не происходят.

Для исследования структуры наплавленного металла при многослойной наплавке производилась четырехслойная наплавка валиков на пластины из стали 45 размером 10×50×200 мм на режиме  $I_{CB} = 380...400$  А,  $U_{д} = 29...30$  В,  $V_{CB} = 19,3$  м/ч.

После наплавки и охлаждения на воздухе образцы подвергали изотермическому отжигу по режиму: нагрев до 850...880 °С, выдержка 1 час. Затем охлаждение со скоростью 50 °С / ч до 650 °С, выдержка 4 часа, далее охлаждение с печью со скоростью 50 °С / ч до 400 °С, затем охлаждение на воздухе. Отжиг наплавленного металла является операцией необходимой не только для снижения его твердости, с целью обеспечения возможности механической обработки, но и для улучшения свойств наплавленного и основного металлов [99].

Внешний вид наплавленных образцов представлен на рис 5.9.



а)



б)

а – наплавка СПП со смесью железного и алюминиевого порошков; б –  
наплавка СПП с экзотермической смесью

Рисунок 5.9 - Внешний вид наплавленных образцов

На свойства стали в рабочем состоянии определяющее влияние оказывает структура, полученная в процессе отжига. Стали с исходной структурой пластинчатого перлита при закалке сохраняют больше остаточного аустенита, имеют более крупное зерно, меньшую прочность, более чувствительны к закалочным трещинам, по сравнению с исходной структурой зернистого перлита. Поэтому инструментальные стали, как правило, отжигают на зернистый перлит [99].

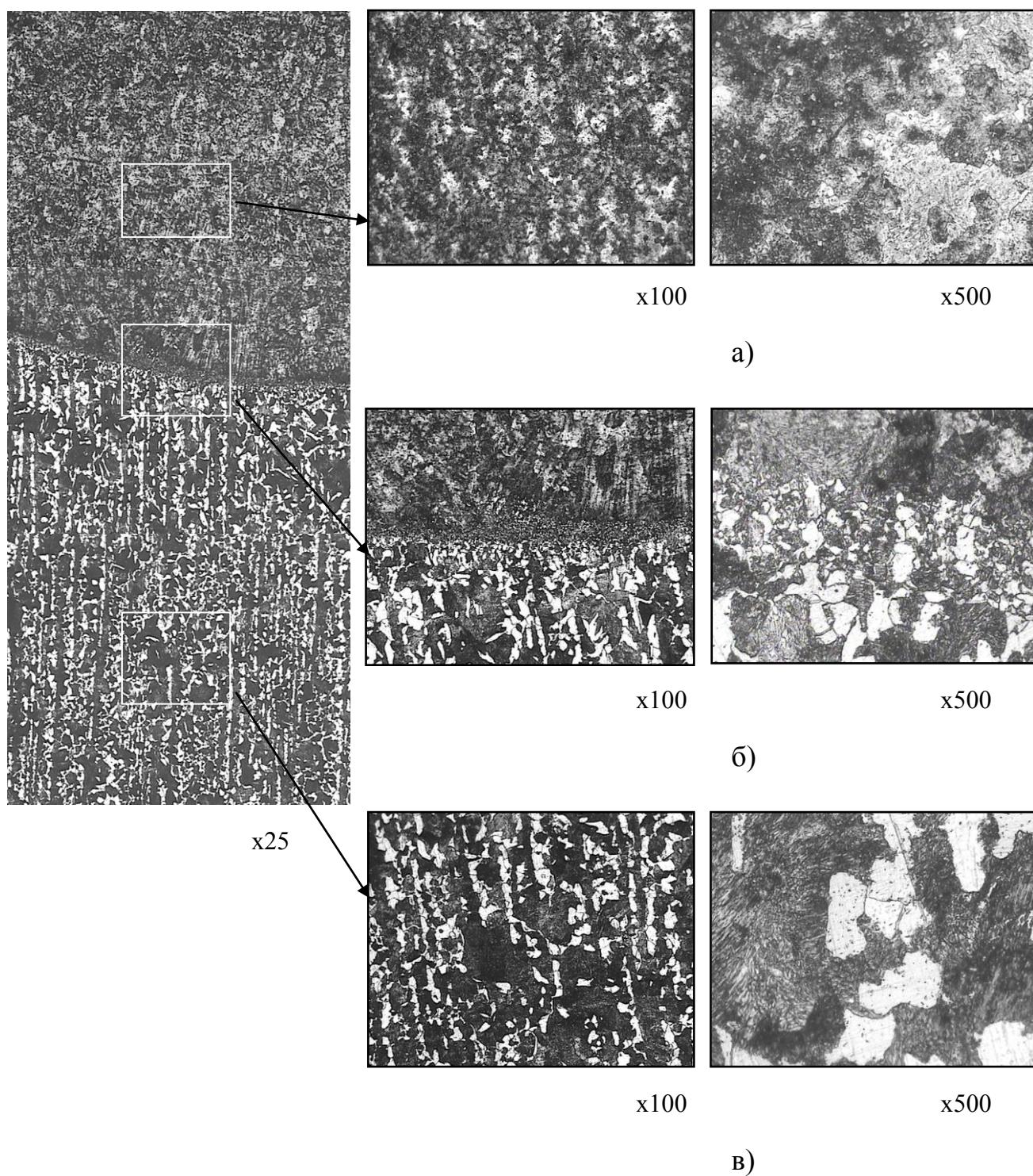
После отжига заготовок изготавливали образцы для закалки с отпуском.

Металлографические исследования наплавленного металла выполняли на базе лаборатории ПАТ «НКМЗ», согласно методике приведенной в п. 2.6. Микроисследования включали изучение структуры наплавленного металла и зоны сплавления. Результаты исследования структуры наплавленного металла и зоны сплавления после отжига приведены на рис. 5.10 и рис. 5.11.

При наплавке СПП без экзотермической смеси наплавленный металл имеет структуру перлита (рис. 5.10, а). Величина зерна оценивается 6 номером шкалы №1 ГОСТ 5639-82. Структура зоны сплавления – феррит и перлит (рис. 5.10, б). Величина зерна оценивается 8 номером шкалы №1. Структура основного металла – феррит и перлит (рис. 5.10, в). Величина зерна оценивается 2 и 6 номером шкалы №1.

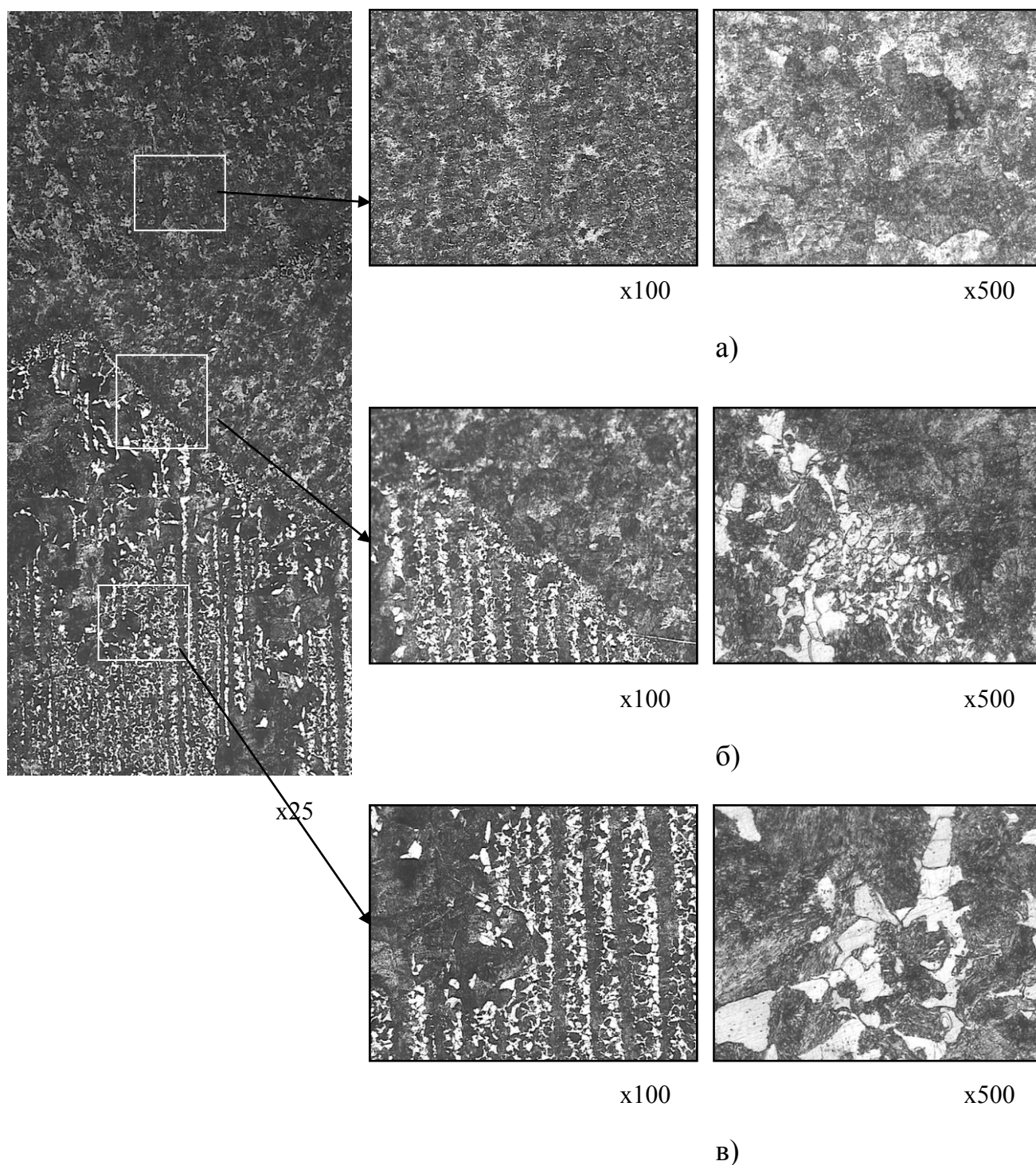
При наплавке СПП с экзотермической смесью наплавленный металл имеет более мелкозернистую структуру, в которой появляются карбиды. Структура наплавленного металла – перлит и карбиды (рис. 5.11, а). Величина зерна оценивается 7 номером шкалы №1 ГОСТ 5639-82. Структура зоны сплавления – феррит и перлит (рис. 5.11, б). Величина зерна оценивается 9 номером шкалы №1. Структура основного металла – феррит и перлит (рис. 5.11, в). Величина зерна оценивается 2 и 6 номером шкалы №1.

Загрязненность наплавленного металла неметаллическими включениями обоих образцов не превышает второй балл шкал ГОСТ 1778-70.



а – микроструктура наплавленного металла; б – микроструктура зоны сплавления; в – основной металл

Рисунок 5.10 – Микроструктура металла, наплавленного СПП без экзотермической смеси, после отжига



а – микроструктура наплавленного металла; б – микроструктура зоны сплавления; в – основной металл

Рисунок 5.11 – Микроструктура металла, наплавленного СПП с экзотермической смесью, после отжига



После отжига и исследования микроструктуры образцы подвергались термообработке: закалка – нагрев на температуру 900 °С, выдержка 1 час, охлаждение в масле. Закаленные образцы подвергали отпуску при температуре 250 °С в течении двух часов с последующим охлаждением на воздухе.

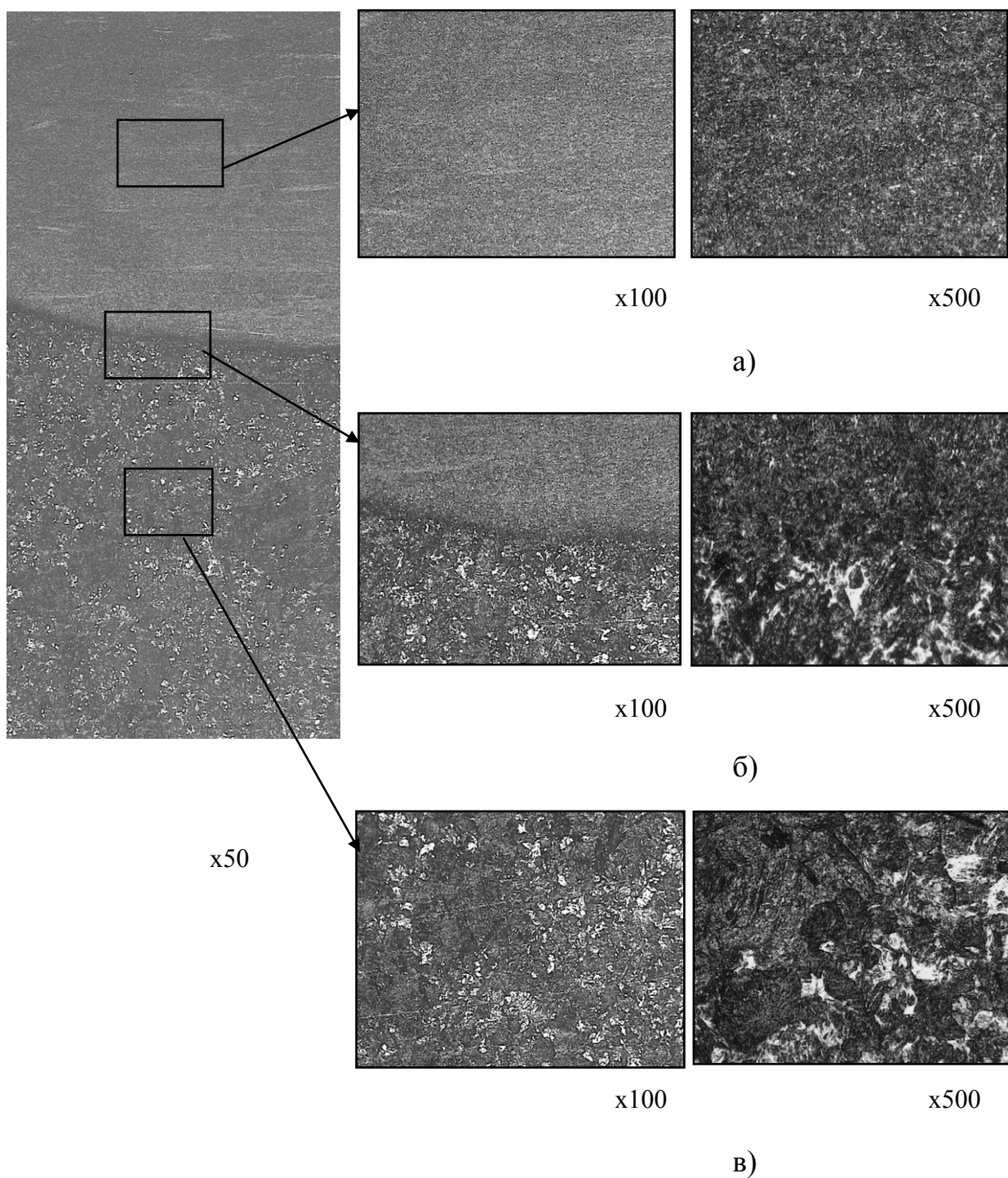
После термообработки производили повторное исследование микроструктуры наплавленного металла и зоны сплавления.

Результаты исследования структуры наплавленного металла и зоны сплавления после термообработки приведены на рис. 5.12 и рис. 5.13.

При наплавке СПП без экзотермической смеси наплавленный металл имеет структуру мелкоигльчатый мартенсит и карбиды (рис. 5.12, а). Структура зоны сплавления – мелкоигльчатый мартенсит (рис. 5.12, б). Структура основного металла – бейнит и сорбит (рис. 5.12, в). Твердость наплавленного металла составляет 55...57 HRC.

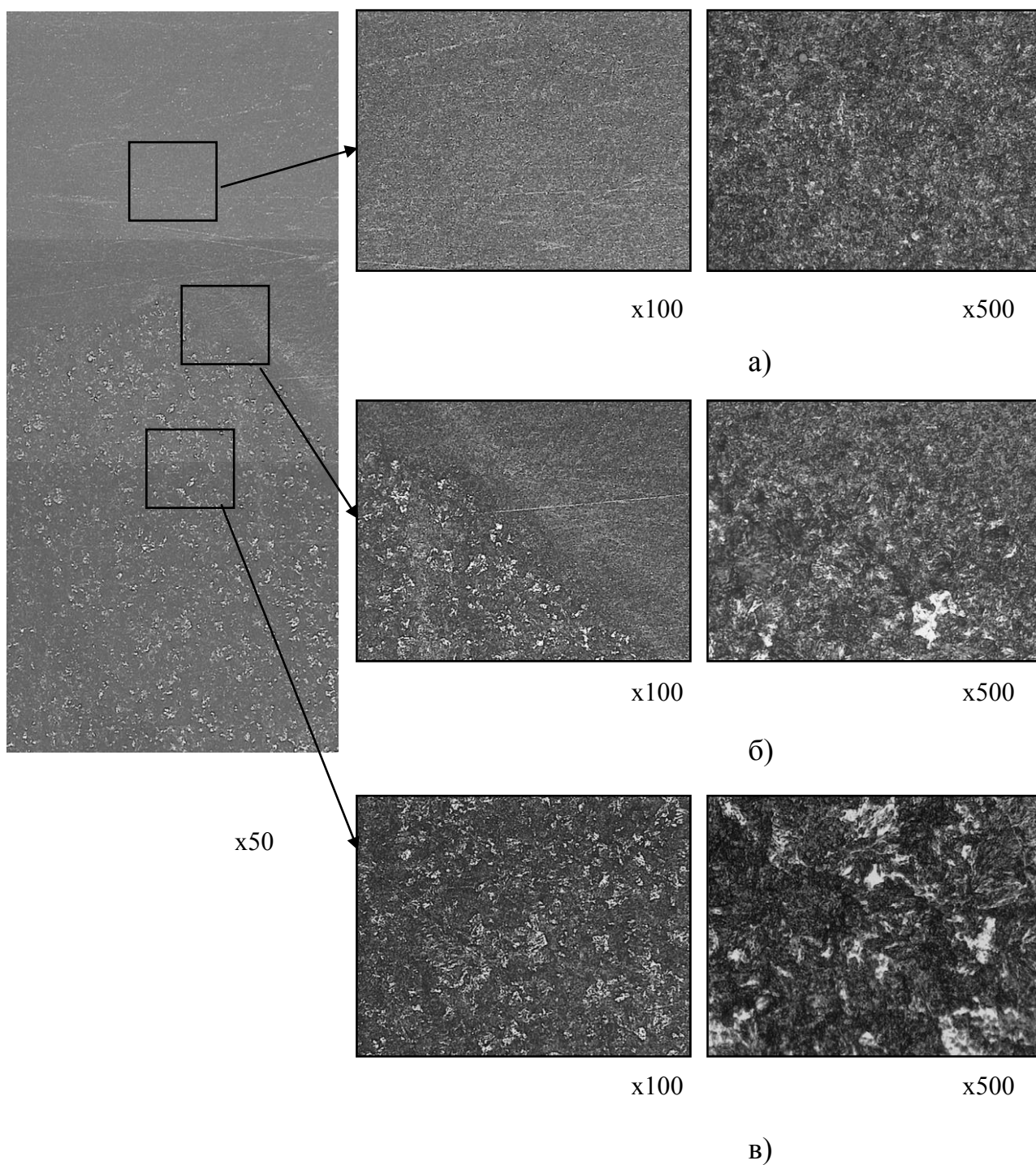
При наплавке СПП с экзотермической смесью структура наплавленного металла – мелкоигльчатый мартенсит и карбиды (рис. 5.13, а). Структура зоны сплавления – мелкоигльчатый мартенсит и карбиды (рис. 5.13, б). Структура основного металла – бейнит и троостит (рис. 5.13, в). Твердость наплавленного металла составляет 57...59 HRC.

При микроструктурном анализе образцов трещин и непроваров по линии сплавления не выявлено, а переход от основного металла к наплавленному – плавный.



а – микроструктура наплавленного металла; б – микроструктура зоны сплавления; в – основной металл

Рисунок 5.12 – Микроструктура металла, наплавленного СПП без экзотермической смеси, после термообработки



а – микроструктура наплавленного металла; б – микроструктура зоны сплавления; в – основной металл

Рисунок 5.13 – Микроструктура металла, наплавленного СПП с экзотермической смесью, после термообработки

### 5.3 Технологические особенности наплавки штампов

Технологический процесс восстановления штампового инструмента состоит из следующих основных операций:

- а) подготовка инструмента под наплавку;
- б) предварительный подогрев перед наплавкой;
- в) электродуговая наплавка самозащитной порошковой проволокой;
- г) отжиг наплавленного инструмента;
- д) механическая обработка;
- е) закалка и отпуск наплавленного инструмента.

При восстановлении изношенного инструмента необходимо произвести его тщательный осмотр с целью выявления дефектов. Удалению дефектов – различных сколов, трещин и т.д. должно уделяться особое внимание, так как оставшиеся дефекты могут стать при наплавке источником новых.

Изношенные штампы в местах под наплавку подвергались предварительной механической обработке, при этом они, как правило, отжигались, для снижения твердости до уровня достаточного для механической обработки (твердость  $\leq 25\text{HRC}$ ). Обработка осуществлялась в изношенных местах на глубину 3 – 5 мм в зависимости от глубины изнашивания и залегания дефектов.

Для предотвращения образования горячих и холодных трещин в наплавленном металле перед наплавкой выполняли предварительный подогрев до температуры 330 – 420 °С.

Для получения наплавленного слоя металла толщиной 5...7 мм (в зависимости от степени износа) с учетом припуска 1,5...2,0 мм на последующую механическую обработку, изношенную поверхность инструмента наплаваем самозащитной экзотермической порошковой проволокой диаметром 4 мм в 2...3 слоя, на постоянном токе обратной полярности на режимах:  $I_{\text{св}} = 380...400 \text{ А}$ ,  $U_{\text{д}} = 29...30 \text{ В}$ , вылет электрода

$l = 30 \dots 35$  мм, скорость наплавки  $V_n = 19,3$  м/ч. В ходе наплавки не допускается охлаждение инструмента ниже температуры предварительного подогрева. Валики накладываются так, чтобы каждый последующий перекрывал на  $1/2 - 1/3$  часть ширины предыдущего. Наплавляемая поверхность получается достаточно ровной без наплывов и провалов между валиками. Наложение последующих слоев производили как после снятия шлака так и по слою шлака. Внешний вид наплавленного пробивного пуансона показан на рис. 5.14.



Рисунок 5.14 – Внешний вид наплавленного пробивного пуансона

После наплавки и охлаждения на воздухе инструмент подвергали изотермическому отжигу по режиму: нагрев до  $850 \dots 880$  °С, выдержка 1 час. Затем охлаждение со скоростью  $50$  °С / ч до  $650$  °С, выдержка 4 часа, далее охлаждение с печью со скоростью  $50$  °С / ч до  $400$  °С, затем охлаждение на воздухе. После отжига инструмент подвергали механической обработке, которая выполняется в соответствии с технической документацией на штамповый инструмент.

После механической обработки наплавленный инструмент подвергали окончательной термической обработке – закалке с последующим отпуском. Нагрев под закалку проводили в электрической печи до температуры  $900 \dots 950$  °С, выдерживали в течение одного часа, затем охлаждали в масле.

Закаленные образцы подвергали отпуску при температуре 250 °С в течении двух часов с последующим охлаждением на спокойном воздухе. После отпуска твердость наплавленного металла 57...59 HRC.

По результатам испытаний на ПАО «Энергомашспецсталь» опытной партии, разработанной в настоящей работе, наплавочной порошковой проволоки получена повышенная на 45...50 %, по сравнению с самозащитной порошковой проволокой ВЕЛТЕК-Н480С, стойкость наплавленного инструмента, которая составила до 30 тыс. штампоударов при вырубке деталей толщиной 4...10 мм. При наплавке наблюдалась высокая стабильность процесса, хорошее формирование наплавленного металла, равномерность плавления сердечника и оболочки проволоки, хорошая отделимость шлаковой корки. Трещин, пор и шлаковых включений в наплавленном металле не обнаружено. Акт внедрения порошковой проволоки прилагается в приложении.

#### Выводы по разделу 5

1. Введение экзотермической смеси в состав шихты сердечника СПП приводит к уменьшению температуры предварительного подогрева на 30...40 °С за счет дополнительного нагрева металла в результате протекания экзотермической реакции, что позволяет обеспечить энергосбережение.

2. Металл, наплавленный разработанной самозащитной экзотермической порошковой проволокой, соответствует стали 8Х3ГСВ2Ф, и имеет следующий химический состав: 0,75...0,8 % С; 0,8...0,85 % Si; 1,0...1,1 % Mn; 2,65...2,75 % Cr; 0,2...0,3 % V; 2,1...2,2 % W.

3. Установлено, что введение экзотермической смеси в состав шихты сердечника СПП, приводит к уменьшению размера зерна аустенита и повышению ударной вязкости наплавленного металла. Согласно результатам

расчета ударная вязкость возрастает до 30 %.

4. При наплавке СПП с экзотермической смесью структура наплавленного металла после термообработки – мелкоигльчатый мартенсит и равномерно распределенные карбиды. Твердость наплавленного металла составляет 57...59 HRC.

5. Разработана технология восстановительной наплавки штампового инструмента самозащитной порошковой проволокой ППЭН-8Х3ГСВ2Ф, позволяющая повысить на 45...50 % стойкость наплавленного инструмента, применяемого на ПАО «Энергомашспецсталь».

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и решена актуальная научно-техническая задача упрочнения штампового инструмента путем его наплавки самозащитной порошковой проволокой (СПП) с экзотермической смесью, что позволило расширить знания в области разработки наплавочных материалов и применения экзотермической смеси, повысить качество продукции, снизить затраты энергетических и материальных ресурсов.

2. Доказано, что введение в шихту сердечника СПП более 35 % экзотермической смеси в виде окалина и алюминиевого порошка в соотношении 4:1 обеспечивает протекание экзотермической реакции с тепловым эффектом, достаточным для подогрева сердечника порошковой проволоки с целью выравнивания скорости его плавления и оболочки, что способствует снижению химической неоднородности наплавленного металла, повышению коэффициентов расплавления и наплавки на 10...13 %, уменьшению потерь электродного металла и величины сварочного тока с 450 до 370 А.

3. Разработанные методики интегрального измерения сварочного тока и количественной оценки качества формирования наплавленного валика позволяют с большой достоверностью установить влияние экзотермической смеси на сварочно-технологические свойства порошковой проволоки и наплавленного металла. Получила дальнейшее развитие методика расчета коэффициента расплавления, позволяющая учитывать влияние экзотермической реакции на увеличение производительности плавления СПП.

4. Установлено, что введение экзотермической смеси в состав шихты порошковой проволоки способствует снижению температуры плавления и поверхностного натяжения шлака, относящегося к шлаковой системе  $\text{CaF}_2\text{--CaO--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ , увеличению его плотности и вязкости. Такое изменение



физических свойств шлака обеспечивает хорошую кроющую способность, отделимость шлакового покрытия, формирование наплавленного металла.

5. При разработке самозащитной экзотермической порошковой проволоки (СЭПП) определен рациональный состав газшлаковой составляющей наполнителя, позволяющий за счет использования композиции карбонатов щелочных металлов  $\text{CaCO}_3 = 38...42\%$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3 = 12...25\%$ ,  $\text{MgCO}_3 = 20...25\%$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 = 17...23\%$  обеспечить в наплавленном металле содержание азота  $[\text{N}] \leq 0,034\%$  и кислорода  $[\text{O}] \leq 0,021\%$ .

6. Рассчитаны коэффициенты перехода легирующих элементов с учетом содержания газшлакообразующей составляющей проволоки и основности шлака, что позволило получить состав СЭПП марки 8ХЗГСВ2Ф для наплавки штампового инструмента выполняющего разделительные операции в холодном состоянии (масс.%):  $\text{C}_{\text{гш}} - 9\%$ ;  $\text{Q}_{\text{э.с}} - 14...15\%$ ;  $\text{FeMn} - 1,7...2,0\%$ ;  $\text{FeTi} - 1,1...1,2\%$ ;  $\text{FeSi} - 1,6...1,8\%$ ;  $\text{Cr} - 2,9...3,2\%$ ;  $\text{W} - 2,2...2,5\%$ ;  $\text{FeV} - 0,7...0,9\%$ ; графит серебристый –  $0,9...1,1\%$ ; стальная оболочка – остальное. Установлено, что применение экзотермической смеси в составе сердечника проволоки приводит к увеличению ширины наплавленного валика на  $8...10\%$ , высоты усиления – на  $25...30\%$  и уменьшению глубины проплавления на  $32...37\%$ , повышению производительности наплавки.

7. Доказано, что разработанная технология восстановительной наплавки штампового инструмента позволяет получить металл с твердостью  $57...59 \text{ HRC}$  и ударной вязкостью  $380...410 \text{ кДж/м}^2$ , структуру наплавленного металла - мелкоигльчатый мартенсит с равномерно распределенными карбидами.

8. Промышленные испытания разработанной порошковой проволоки показали повышение на  $45...50\%$  стойкости наплавленного инструмента, применяемого на ПАО «Энергомашспецсталь», и снижение энергоемкости процесса восстановления изношенного инструмента за счет дополнительного тепловложения от экзотермической реакции.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зареченский А. В. Особенности плавления порошковых лент с термитными смесями / А. В. Зареченский, Л. К. Лещинский, В. В. Чигарев // Сварочное производство. – 1985. – №8. – С. 39-41.
2. Иоффе О. М. Влияние титано - термитной смеси, входящей в электродное покрытие, на повышение производительности сварки / И. С. Иоффе, О. М. Кузнецов, В. М. Питецкий // Сварочное производство. – 1980. – №3. – С. 26-28.
3. Мазур А. А. Рынок сварочных материалов Украины / А. А. Мазур, С. В. Пустовойт, В. С. Петрук, Н. С. Бровченко // Автоматическая сварка.– 2014. – № 6-7. – С. 49-55.
4. Теория сварочных процессов : учебник для вузов / А. В. Коновалов, А. С. Куркин, Э. Л. Макаров, В. М. Неровный, Б. Ф. Якушин. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 752 с.
5. Походня И. К. Сварка порошковой проволокой : монография / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков. – К. : Наукова думка, 1972. – 223 с.
6. Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами / И. К. Походня и др. – К. : Наукова думка, 2004. – 448 с.
7. Tsusumi S. Investigation on current usage and future trends of welding materials / S. Tsusumi, S. Ooyama // Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1759-03 – 2003. – January.
8. Розерт Р. Применение порошковых проволок для сварки в промышленных условиях / Р. Розерт // Автоматическая сварка.– 2014. – №6 – 7. – С. 60-64.
9. Походня И. К. Производство порошковой проволоки / И. К. Походня. – К. : Вища школа, 1986. – 232 с.
10. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением / А. А. Ерохин. – М. :

Машиностроение, 1973. – 448 с.

11. Шлепаков В. Н. Физико - металлургические и сварочно - технологи-ческие свойства газозащитных порошковых проволок для сварки конструкционных сталей / В. Н. Шлепаков // Автоматическая сварка. – 2014. – №6-7. – С. 56-59.

12. Куплевацкий Л. М. Уменьшение отставания плавления сердечника от оболочки при наплавке порошковой проволокой / Л. М. Куплевацкий, М. Г. Лившиц, С. А. Шоно // Повышение качества и эффективности процессов сварки и наплавки: материалы научно-технической конференции. – К. : Наукова думка, 1984. – 100 с.

13. Походня И. К. Состояние и перспективы развития механизированной сварки открытой дугой порошковой проволокой / И. К. Походня // Новые проблемы сварочной техники / Под ред. Б. Е. Патона. – К. : Техника, 1964. – 478 с.

14. Походня И. К. Газы в сварных швах / И. К. Походня. – М. : Машиностроение, 1972. – 256 с.

15. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.

16. Андреев В. В. Современное состояние и технология термитной сварки / В. В. Андреев, П. Е. Дуденко, М. В. Ушаков и др. // Автоматическая сварка. – 1990. – №2. – С. 67-70.

17. Зареченский А. В. Порошковая лента с термитной шихтой / А. В. Зареченский // Повышение качества и эффективности процессов сварки и наплавки: материалы научно-технической конференции. – К. : Наукова думка, 1984. – С. 7-8.

18. Пат. 2454309 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/368. Порошковая проволока / Сапченко И. Г. , Абашкин Е. Е. ; патентообладатель Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук. – № 2010126804/02 ; заявл. 30.06.2010 ; опубл. 10.01.2012. – 3 с.

19. Власов А. Ф. Технологические характеристики электродов с экзотермической смесью в покрытии для наплавки инструментальных сталей / А. Ф. Власов, А. М. Куций // Сварочное производство. – 2011. – №4. – С. 10-15.

20. Дорожкин Н. Н. Дуговая газопорошковая наплавка / Н. Н. Дорожкин, Н. Н. Петюшев. – Минск : Беларусь, 1989. – 94 с.

21. А. с. 1526942 СССР, МКИ<sup>б</sup> В 23 К23/00. Состав термитной смеси / С. И. Попов, В. Б. Харитонов, В. П. Ефимов, О. З. Шарафутдинов, Ю. П. Поручиков. – № 4468128/27-27; заявл. 01.08.88; опубл. 07.12.99, Бюл. № 45.

22. Зареченский А. В. Повышение производительности расплавления порошковой ленты / А. В. Зареченский // Сварочное производство. – 1982. – №7. – С. 33-34.

23. Чигарев В. В. Особенности плавления порошковых лент с экзотермическими смесями в наполнителе / В. В. Чигарев, Д. А. Зареченский, А. Г. Белик // Автоматическая сварка. – 2007. – №2. – С. 53-55.

24. Власов А. Ф. Нагрев и плавление электродов с экзотермической смесью в покрытии / А. Ф. Власов, Н. А. Макаренко, А. М. Куций // Автоматическая сварка. – 2014. – №6-7. – С. 151-154.

25. Глущенко А. С. Повышение производительности расплавленного металла при термитной сварке под флюсом / А. С. Глущенко, А. А. Кощинский // Автоматическая сварка. – 1976. – № 10. – С. 68.

26. Александров А. Г. Регулирование термического цикла при сварке с применением экзотермических смесей / А. Г. Александров, А. Г. Цокур, С. Л. Мимеченко и др. // Сварочное производство. – 1975. – № 11. – С. 34-35.

27. Карпенко В. М. Показатели плавления сварочных электродов с экзотермической смесью в покрытии / В. М. Карпенко, А. Ф. Власов, Г. Б. Билык // Сварочное производство. – 1980. – № 9. – С. 23-25.

28. Малкин Б. В. Термитная сварка / Б. В. Малкин, А. А. Воробьев – М. : МКХ РСФСР, 1963. – 104 с.

29. Антошин Е. В. Газотермическое напыление покрытий / Е. В. Антошин. – М. : Машиностроение, 1974. – 96 с.
30. Линник В. А. Современная техника газотермического нанесения покрытий / В. А. Линник, П. Ю. Пекшев. – М. : Машиностроение, 1982. – 127 с.
31. Пат. 37416 А Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 23/00. Екзотермічна суміш / Лебедев В. Г. – № 98095175; заявл. 30.09.1998; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4. – 2 с.
32. Науменко С. В. Термитная сварка рельсов / С. В. Науменко, А. А. Воробьев. – М. : Стройиздат, 1967. – 176 с.
33. Continuous Welder rail: Bull. America Railway Eng. Association // Proceedings. – 1970. – Vol. 72, № 630. – P. 157-159.
34. Anthony Feliu L. Termite welding gets High Scholl chemistry class on track / Anthony Feliu L. // Gournal Chemical Education. – 2001. – Vol. 78, №1. – P. 15–19.
35. Пат. 97102409 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/36, В 23 К 23/00. Экзотермический сварочный стержень / Новохацкий И. В. ; заявитель и патентообладатель Новохацкий И. В. (UA). – № 97102409/02 ; заявл. 13.02.97 ; опубл. 10.03.99. – 2 с.
36. Пат. 26554 Япония. Термитная смесь для сварки / Тэйкоку Хикохин, Сэйдзо Кабусики, Адати Ютака. – Оpubл. 18.11.66 // Р. Ж. : Сварка. – 1968. – №4. – С. 47.
37. А. с. 1558610 СССР, МКИ<sup>5</sup> В 23 К 23/00. Состав экзотермической смеси / П. Е. Дуденко, Р. Н. Ильиных, А. А. Ерифриади и др. – № 4357794/31-27; заявл. 04.01.88; опубл. 23.04.90, Бюл. № 15. – 4 с.
38. А. с. 1558611 СССР, МКИ<sup>5</sup> В 23 К 23/00. Состав экзотермической смеси / П. Е. Дуденко, Р. Н. Ильиных, М. В. Ушаков и др. – № 4357795/31-27; заявл. 04.01.88; опубл. 23.04.90, Бюл. № 15. – 4 с.
39. Пат. 20096 Япония. Термитная смесь для нагрева / Кабусики кайся Кобэ сэйкосё / Кимура Йосио, Хаяси Куниаки, Нумада, Ацуси. – Заявл. 20.01.66; опубл. 29.08.68 // РЖ.: Сварка, 1969. – №8. –с. 46.
40. Ерохин А. А. Кинетика металлургических процессов дуговой

сварки / А. А. Ерохин. – М.: Машиностроение, 1964. – 265 с.

41. Власов А. Ф. Особенности металлургического процесса плавления электродов с экзотермической смесью / А. Ф. Власов, В. М. Карпенко // Всесоюзная конференция по сварочным материалам (Орел, 8-12 октября 1979 г) : тезисы докладов. – К., 1979. – С. 83–84.

42. Коршунов В. В. Исследование тепловых эффектов экзотермических реакций при термодиффузионном упрочнении деталей сельхозмашин / В. В. Коршунов, Г. В. Гурьянов // Вестник Брянского государственного технического университета, 2011. – №3 (31). – С. 61-66.

43. Баптизманский В. И. Раскисление и легирование стали экзотермическими ферросплавами / В. И. Баптизманский, Е. Н. Исаев, В. И. Жигулин, Я. П. Янкелевич. – К. : Техника, 1970. – 180 с.

44. Ксендопуло. Г. И. Особенности легирования наплавленного металла при сварке электродами с экзотермической смесью в покрытии / Г. И. Ксендопуло, А. В. Яровчук // Автоматическая сварка. – 1997. – №7. – С. 8-13.

45. А. с 1446794 СССР. Состав экзотермической смеси для подогрева металла / П. Е. Дуденко, М. В. Ушаков, Н. Г. Пряникова и др. – Оpubл. 25.05.88 ; Бюл. № 16 – 3 с.

46. Пат. 2357846 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/22, В 23 К 23/00. Состав для термитной сварки / А. В. Цыпин; патентообладатель Цыпин А. В. – № 2007124979/02 ; заявл. 02.07.2007 ; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 16. – 3 с.

47. Справочник по сварке : в 2-х т. / Под ред. Е. В. Соколова. – М. : Машгиз, 1962. – Т. 2.–664 с.

48. Патент 150305 Венгрия. Eljaras hegesztopor eloallitasara alumothermikus sinhegeszteshez / Beres Lajos, Nyeste Matyas, Kiss Lajos. – Заявл. 09.11.61; опубл. 15.07.63 // Р. Ж. : Металлургия, 1964. – №11 (Е). – С. 41.

49. Novak W. Seltener Erden zur Verbesserung der Schienenstechnic / W.Novak // Einsatz. – 1972. – №4. – P. 168–169.

50. А. с. 1779514 СССР, МКИ<sup>5</sup> В 23 К23/00. Состав термитной смеси / И. А. Абдулин, Ф. П. Малякин, А. М. Новцов и др. – № 4949309/08; заявл. 26.06.91; опубл. 7.12.92, Бюл. № 45 – 3 с.

51. А. с. 1780970 СССР, МКИ<sup>5</sup> В 23 К35/368. Порошковая проволока для сварки / В. Д. Терлинский, В. В. Прохоров, С. В. Михайлицин, К. З. Рахимов. – № 48805/97/08; заявл. 21.08.90; опубл. 15.12.92, Бюл. № 46 – 6 с.

52. Гринь А. Г. Отделимость шлаковой корки при наплавке самозащитной порошковой проволокой / А. Г. Гринь, В. М. Карпенко, И. А. Бойко // Вестник ДГМА, Краматорск, 2006. – №5. – С. 169-173.

53. Кирилюк Г. А. Взаимодействие металла электрода и сварочной ванны с азотом при наплавке самозащитной порошковой проволокой / Г. А. Кирилюк, Ю. А. Юзвенко // Автоматическая сварка. – 1983. – №3. – С. 46-47.

54. Гринь А. Г. Повышение стойкости металла против порообразования при наплавке / А. Г. Гринь, С. В. Жариков, И. А. Бойко, Б. А. Трембач, И. А. Трембач // Вісник ДДМА. – Краматорськ, 2011. – № 4 (25). – С. 191-195.

55. Кассов В. Д. Моделирование процессов восстановления деталей горнорудного оборудования порошковой проволокой / В. Д. Кассов, А. В. Сатонин, Е. В. Бережная, Ю. А. Чепель // Вестник ДГМА. – Краматорск, 2011. – №2 (8Е). – С. 28-31.

56. Кассов В. Д. Влияние газшлакообразующих компонентов порошковой проволоки на характеристики макропереноса / В. Д. Кассов, А. П. Литвинов, В. С. Скрипниченко // Вісник Східноукраїнського національного університету. – Луганськ, 2002. – №7 (53). – С. 90-95.

57. Макиенко В. М. Влияние компонентов шлаковой системы порошковых проволок на технологичность процесса наплавки и механические свойства наплавленного металла / В. М. Макиенко, Д. В. Строителей, Е. М. Баранов, И. О. Романов // Сварочное производство. – 2006. – №10. – С. 7-10.

58. Гринь А. Г. Исследование физических свойств и структуры шлаков образовавшихся при наплавке порошковыми проволоками / А. Г. Гринь, С. В. Жариков, И. А. Бойко // Вісник ДДМА. – Краматорськ, 2011. – № 4 (25). – С. 185-190.

59. Билык Г. Б. Влияние газозлакообразующих компонентов самозащитной порошковой проволоки на переход легирующих элементов в наплавленный металл / Г. Б. Билык, В. М. Карпенко, Ю. Д. Дорофеев, В. Т. Журба // Автоматическая сварка. – 1980. – №8. – С. 60-62.

60. Пат. 2294273 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/368. Порошковая проволока для наплавки / Березовский А. В. , Балин А. Н. , Степанов Б. В. и др. – № 2005106503/02 ; заявл. 09.03.2005 ; опубл. 27.02.2007, Бюл. № 6. – 8 с.

61. Моравецкий, С. И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке. Ч. 2. Характер влияния основных факторов на отделимость шлаковой корки / С. И. Моравецкий // Автоматическая сварка. – 2011. – № 2. – С. 22-26.

62. Походня И. К. Отделимость шлаковой корки электродов с основным покрытием / И. К. Походня, В. И. Карманов, В. Н. Упырь // Автоматическая сварка. – 1980. – №11. – С. 32-34.

63. Порошковые проволоки для электродуговой сварки. Каталог-справочник / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. А. Шлепаков и др. – К. : Наукова думка, 1980. – 180 с.

64. Пат. 78153 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/365. Склад електродного покриття / Калін М. А. , Багров В. А. , Барташ С. М. – № u201210389; заявл. 11.03.2013; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5. – 5 с.

65. Походня И. К. Кинетика образования промежуточного слоя между металлом и шлаковой коркой / И. К. Походня, М. Л. Демченко, И. Р. Явдошин и др. // Автоматическая сварка. – 1977. – №2. – С. 1-5.

66. Карпенко В. М. Исследование условий повышения стойкости наплавленного инструмента для холодной штамповки : автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.03.06 / Карпенко В. – К., 1970. – 22 с.



67. Хомусько Ф. А. Самозащитная порошковая проволока для механизированной наплавки / Ф. А. Хомусько, В. А. Гавриш, А. М. Посудневский // Автоматическая сварка. – 1979. – №11. – С. 53-55.

68. Сазонов Ф. А. Самозащитная порошковая проволока для наплавки углеродистой стали / Ф. А. Сазонов // Сварочное производство. – 1977. – №7. – С. 48-50.

69. Юзвенко Ю. А. Защита металла при наплавке порошковой проволокой открытой дугой / Ю. А. Юзвенко, Г. А. Кирилюк // Автоматическая сварка. – 1974. – №1. – С. 58-60.

70. Пат. 864 Україна, МПК<sup>5</sup> В 23 К 35/368. Електродний дріт для зварювання низьковуглецевих, низьколегованих сталей в захисних газах / Воропай М. М., Алимов А. Н., Тагановський В. М., Микитенко О. М. – № 4664279/su; заявл. 07.12.92; опубл. 15.12.1993, Бюл. № 2. – 8 с.

71. Пат. 32719 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/30. Склад самозахисного порошкового дроту / Гринь О. Г., Бойко І. О. – № u200800803; заявл.; опубл. 26.05.2008, Бюл. № 10. – 2 с.

72. Пат. 2074078 Российская Федерация, МПК<sup>5</sup> В 23 К 35/368. Шихта порошковой проволоки / Кирьяков В. М., Чертов А. И., Гордонный В. Г. и др. – № 93033503/08 ; заявл. 26.09.1993 ; опубл. 27.02.1997. – 3 с.

73. А. с. 625883 СССР, МКИ<sup>2</sup> В 23 К 35/368. Состав порошковой проволоки / С. А. Шоно, Л. М. Куплевацкий, В. М. Карпенко. – № 2473286 / 25-27 ; заявл. 11.04.77 ; опубл. 30.09.78, Бюл. № 36. – 3 с.

74. А. с. 904948 СССР, МКИ<sup>3</sup> В23К 35/36. Шихта порошковой проволоки / И. К. Походня, В. Н. Головкин; Институт электросварки им. Е. О. Патона (СССР). – № 2833853 / 25-27 ; заявл. 26.09.78 ; опубл. 15.02.82, Бюл. № 6 . – 4 с.

75. А. с. 833411 СССР, МКИ<sup>3</sup> В23 К 35/368. Состав порошковой проволоки / Ю. А. Гаврилюк, В. Г. Добышев, Н. П. Ильенко и др. – № 2867677 / 25-27 ; заявл. 10.01.80 ; опубл. 30.05.81, Бюл. № 20 . – ; 4с.

76. Питецкий В.М. Патентные проработки в области конструкций,

способов изготовления и составов порошковой проволоки / В. М. Питецкий и др. // Электротехническая промышленность. Сер. 2. Электросварка. – 1997. – № 4 (43). – С. 19.

77. Есин Н. А. Физическая химия пирометаллургических процессов / Н. А. Есин, П. В. Гельф. – М. : Metallurgy, 1966. – 710 с.

78. Зубцов А. Ф. Стойкость штампов / А. Ф. Зубцов, В. Д. Корсаков. – Л. : Машиностроение, 1971. – 200 с.

79. Кальянов В. Н. Наплавка вырубных штампов порошковой проволокой / В. Н. Кальянов, И. С. Веретенников, И. В. Пирков // Сварочное производство. – 1984. – №7. – С. 10-11.

80. Ракошиц Г. С. Изготовление и сборка штампов / Г. С. Ракошиц. – М. : Машиностроение, 1968. – 168 с.

81. Ефименко Н. Г. Материалы и технология упрочнения режущего инструмента / Н. Г. Ефименко // XLV науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, науковців, аспірантів та співробітників академії (Харків, 2-15 березня 2012 р.) : збірник тез доповідей. – Х., 2012. – Ч. 3. – С. 12.

82. Зубцов М. Е. Повышение стойкости штампов для холодной штамповки / М. Е. Зубцов. – ЛДНТП, 1960. – 84 с.

83. Ефименко Н. Г. Наплавочный материал для упрочнения рабочих кромок штампового инструмента / Н. Г. Ефименко, А. М. Ляпунов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Х. : НТУ «ХПІ», 2011. – №58. – С. 12-16.

84. Карпенко В. М. Свойства наплавленной стали для штампов холодной деформации / В. М. Карпенко, В. Т. Катренко // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ : ДДМА, 1998. – 419 с.

85. Ткачев В. Н. Методы повышения долговечности деталей машин / В. Н. Ткачев, Б. М. Фиштейн, В. Д. Власенко, В. А. Уланов. – М. : Машиностроение, 1971. – 272 с.

86. Рябцев И. А. Материалы и энергосберегающие технологии

наплавки для восстановления и изготовления деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев, Ю. М. Кусков, И. А. Кондратьев, Я. П. Черняк, И. И. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2007. – №3. – С. 21-26.

87. Орлов Л. Н. Восстановительная наплавка порошковой проволокой деталей металлургического и горнодобывающего оборудования / Л. Н. Орлов, А. А. Голякевич, В. И. Титаренко, В. Н. Пелешко // Автоматическая сварка. – 2005. – №12. – С. 45-50.

88. Соломка Е. А. Восстановительная и упрочняющая наплавка деталей штампового оборудования / Е. А. Соломка, А. И. Лобанов, Л. Н. Орлов, А. А. Голякевич, А. В. Хилько // Автоматическая сварка. – 2014. – №6-7. – С. 111-113.

89. Нузов А. Я. Стойкость и стоимость штампов при объемной штамповке / А. Я. Нузов // Кузнечно-штамповочное производство.– 1961. – №12. – С. 34-37.

90. Пат. 2259266 Российская Федерация, МПК В 23 К 35/368, В 22 F 5/12. Порошковая проволока для износостойкой наплавки / В. В. Рыбин А. В. Баранов, Е. В. Андронов и др. – № 20031256633/02 ; заявл. 20.08.2003 ; опубл. 27.08.2005 – 2 с.

91. Антонов В. А. Восстановительная наплавка малогабаритных штампов холодной штамповки / В. А. Антонов, И. А. Кондратьев. – Режим доступа : [http://www.engineering-surface.com.ua/ru/ss/vosstanovitel'naja\\_naplavka\\_malogabaritnih\\_shtampov.html](http://www.engineering-surface.com.ua/ru/ss/vosstanovitel'naja_naplavka_malogabaritnih_shtampov.html)

92. Материалы и технологии дуговой наплавки штампов и штамповой оснастки / Научно-технический комплекс «ИЭС им. Е. О. Патона». – Режим доступа : <http://stc-paton.com/rus/equipment/recovery21>

93. Антонов В.А. Наплавка вырубных штампов холодной штамповки / В. А. Антонов // Наплавка в машиностроении и ремонте. – К., 1981. – С. 43-44.

94. Cumpel P und and. Neu fige und Zukunftige Simation auf dem Gebiete dir Versorgung mit den legirungselementen // IEW, Technische Bericht. – 1979. – Bd 8, №2. – P. 75-82.

95. Бармин Л. Н. Разработка износостойких наплавочных материалов и процессов их наплавки / Л. Н. Бармин, В. П. Гусев // Современные способы наплавки и их применение. – К. : АН УССР. ИЭС им. Е. О. Патона, 1982. – С. 40-47.

96. А. с. 1367322 СССР, В 23 К 35/368. Порошковая проволока для наплавки / В. М. Карпенко, А. Г. Гринь, И. Д. Писаренко (СССР). – № 4011298 / 31-27 ; заявл. 22.01.86.

97. Позняк Л. А. Штамповые стали / Л. А. Позняк, Ю. М. Скрыпченко, С. И. Тишаев. – М. : Металлургия, 1980. – 244 с.

98. Карпенко В. М. Влияние окислов редкоземельных элементов на защитные свойства шлаков при наплавке открытой дугой / В. М. Карпенко, А. Г. Гринь, А. А. Яцура // Повышение качества и эффективности процессов сварки и наплавки. – К., 1984. – С. 75–76.

99. Геллер Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер – М. : Металлургия, 1983. – 527 с.

100. Наплавочная проволока. Черная и цветная металлургия / Предприятие «ТМ.ВЕЛТЕК». – Режим доступа : <http://www.tm-veltek.ru/wire/melt>

101. Шоно С.А. Плавкость шлаков, образующихся при износостойкой наплавке порошковой проволокой / С. А. Шоно // Автоматическая сварка. – 1976. – №3. – С. 22-24.

102. Гладкий В. Н. Вискозиметрия металлургических расплавов / В. Н. Гладкий. – М. : Металлургия, 1989. – 95 с.

103. Колисник В. Н. Методические вопросы измерения вязкости расплавов флюсов / В. Н. Колисник, У. А. Сагинов, В. И. Галинич, В. С. Сидорук // Сварочные флюсы и шлаки. – Николаев, 1974. – С. 163.

104. Харлашин П. С. Исследование физико-химических характеристик шлакообразующих смесей с целью оптимизации их составов / П. С. Харлашин, Ю. И. Кирюшкин, О. Е. Чернуха // Вестник ПГТУ, 1998. – №6. – С. 15-20.

105. Alichorn R. Исследование физических свойств сварочных флюсов / R. Alichorn, R. Releisen // *Sehweiben und Sehneiden*. – 1977. – №3. – P. 99-100.

106. Воронов В.А. К расчету поверхностного натяжения, определенного методом максимального давления в газовом пузырьке / В. А. Воронов, Б. М. Никитин // *Заводская лаборатория*. – 1973. – №6. – С. 721.

107. Якобашвили С. Б. Поверхностные свойства сварочных флюсов и шлаков / С. Б. Якобашвили. – К. : Техніка, 1970. – 205 с.

108. А. с. 1097473 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 23 К 35/40. Способ оценки кроющей способности сварочного шлака / В. М. Карпенко, М. Г. Лившиц, А. Г. Гринь. – № 19833579045; опубл. 15.06.84, Бюл. № 22. – 3 с.

109. Моравецкий С. И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке. Ч. 2: Характер влияния основных факторов на отделимость шлаковой корки / С. И. Моравецкий // *Автоматическая сварка*. – 2011. – №2. – С. 22-26.

110. Моравецкий С.И. Отделимость шлаковой корки при дуговой сварке. Ч. 1 : Механизм химического сцепления шлака с металлом шва / С. И. Моравецкий // *Автоматическая сварка*. – 2011. – №1. – С. 32-36.

111. Yukio Hirai. Development of the narrow gap submerged arc welding process – NSA process / Yukio Hirai, Masaaki Tokuhisa, Itaru Yamashita [et al.] // *Kawasaki Steel Techn. Rep.* – 1982. – №5. – P. 81-93.

112. Wittung L. Some physical and chemical properties of welding slags and their influence of slag detachability / L. Wittung // *Weld pool chemistry and metallurgy: Intern. conf., London, Apr. 15–17, 1980.* – London, 1980 – Vol. 1. – P. 83-92.

113. А. с. 407686 СССР, В 23 К 29/00. Способ оценки отделимости шлакового покрытия / В. Н. Липодаев, В. А. Бойко, Ю. Н. Каховский, Л. С. Захаров. – № 19721801260; опубл. 10.12.73, Бюл. № 47 – 3 с.

114. Гринь А. Г. Методика оценки отделимости шлаковой корки / А. Г. Гринь, А. А. Богуцкий // *Автоматическая сварка*. – 1996. – №3. – С. 58-59.

115. Пат. 25928 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 28/00. Спосіб оцінки відділення шлакового покриття від поверхні наплавленого металу / Гринь О. Г. ,

Карпенко В. М., Бойко І. О., Богуцький О. А. . – № u200704597; заявл. 25.04.2007; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 13. – 2 с.

116.Размышляев А. Д. Производительность расплавления электродной проволоки при дуговой наплавке под флюсом с воздействием поперечного магнитного поля / А. Д. Размышляев, М. В. Миронова, К. Г. Кузьменко, П.П.А.Выдмыш // Автоматическая сварка. – 2011. – № 5. – С. 48-51.

117.Карпенко В. М. Влияние субмикроскопических включений в наплавленном металле на стойкость штампов / В. М. Карпенко, В. Т. Катренко, В. Д. Кассов // Сварочное производство. – 1972. – №12. – С. 14-16.

118. Пат. 32664 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 28/00. Спосіб оцінки рівномірності плавлення самозахисного порошкового дроту / Гринь О. Г., Карпенко В. М., Бойко І. О. – № u200800345; заявл.10.01.2008 ; опубл. 26.05.2008, Бюл. № 10 – 2 с.

119.Математическая статистика / Под ред. В. М. Ивановой. – М.: Высшая школа, 1981. – 371 с.

120.Жариков С. В. Влияние экзотермической смеси в составе сердечника самозащитной порошковой проволоки на характеристики плавления / С. В. Жариков, В. К. Лысак, А. В. Журавлев // Вісник ДДМА. – Краматорськ, 2011. – №1 (22). – С. 82-85.

121.Жудра А. П. Использование комплексно-легированных порошков, полученных методом термоцентробежного распыления, в порошковых проволоках / А. П. Жудра, С. Ю. Кривчиков, В. И. Дзыкович // Автоматическая сварка. – 2014. – №12. – С. 41-45.

122.Єфіменко М. Г. Металлографія зварних з'єднань / М. Г. Єфіменко, Н. О. Радзівілова. – Х.: Українська інженерно-педагогічна академія, 2006. – 92 с.

123.Самойлов Н. С. Методы исследования и испытания металлов. Металлографические исследования / Н. С. Самойлов – Режим доступа: [www.naukaspb.ru/spravochniki](http://www.naukaspb.ru/spravochniki)

124.Канарчук В. Е. Методы исследования металлов : учеб. пособие /

В. Е. Канарчук, В. И. Шевченко. – К. : НТК, 2002. – 98 с.

125. Brandon D. Microstructural Characterization of Materials / D. Brandon, W. D. Kaplan . –Chichester, England : John Wiley & Sons Ltd., 2008. – 536 p.

126. Кассов Д. С. Влияние карбидной фазы наплавленного металла на стойкость штампов / Д. С. Кассов, В. М. Карпенко, Е. И. Юрченко // Сварочное производство. – 1969. – №1. – С. 11-13.

127. Системы анализа изображений и моделирования структур SIAMS Photolab™ / Компания SIAMS. – Режим доступа : [http://www.siams.com/products/photolab/siams\\_photolab.htm](http://www.siams.com/products/photolab/siams_photolab.htm)

128. Жариков С. В. Влияние экзотермической смеси, входящей в состав наполнителя самозащитной порошковой проволоки на повышение производительности наплавки / С. В. Жариков, В. М. Карпенко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ, 2002. – №7 (53). – С. 133-137.

129. Власов А. Ф. Применение окислы в электродном производстве / А. Ф. Власов, В. М. Карпенко // Сварочное производство. – 1982. – №2. – С. 6-8.

130. Юзвенко Ю. А. Модель плавления самозащитной порошковой проволоки / Ю. А. Юзвенко, Г. А. Кирилюк, С. Ю. Кривчиков // Автоматическая сварка. – 1983. – №1 (358). – С. 26-29.

131. Жариков С. В. Влияние экзотермической смеси в составе сердечника самозащитной порошковой проволоки на химическую неоднородность наплавленного металла / С. В. Жариков // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ, 2008. – №8 (126), ч.2. – С. 97-101.

132. Жариков С. В. Исследование шлаков образовавшихся при наплавке экзотермическими порошковыми проволоками / С. В. Жариков, А. Г. Гринь // Сварочное производство. – 2014. – №5. – С. 17-21.

133. Есин О. А. Физическая химия пирометаллургических процессов / О. А. Есин, П. В. Гельд. – М. : Metallurgia, 1966. – 710 с.

134.Эйтель В. Ф. Физическая химия силикатов / В. Ф. Эйтель. – М. : Иностранная литература, 1962. – 1055 с.

135.Ефименко Н. Г. Применение нового минерального сырья Украины для производства сварочных электродов / Н. Г. Ефименко, Н. А. Калин // Состояние и перспективы развития сварочных материалов в странах СНГ: труды I Международной конференции по сварочным материалам стран СНГ. – М., 1998. – С. 221-223.

136.Пат. 32990 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/365. Склад електродного покриття / Калін М. А. , Єфіменко М. Г. , Ширяєва Л. В. – № u200800777; заявл. 22.01.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11. – 5 с.

137.Пат. 36226 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/30. Склад для самозахисного порошкового дроту / Гринь О. Г. , Бойко І. О. – № u200714790; заявл. 26.12.2007; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 20. – 2 с.

138.Пат. № 26651 Україна, МКИ<sup>6</sup> В 23 К 35/365. Склад електродного покриття / Єфіменко М. Г. , Калін М. А. – № 93111486; заявл. 10.01.1993; опубл. 12.11.1999, Бюл. № 7. – 8 с.

139.Пат. 81057 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/00, 35/40. Склад електродного покриття для ручного дугового зварювання мало вуглецевих низьколегованих сталей / Кущій Г. М. , Кассов В. Д. , Бондарев С. В. . – № u201212164; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 9 с.

140. Пат. 75517 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/30. Склад порошкового дроту / Гринь О. Г. , Бойко І. О. , Пресняков В. А. , Гаврилов О. В. , Оленич О. А. , Волков С. М. , Паровішник М. М. – № u201204055; заявл. 02.04.2012; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23. – 4 с.

141.Пат. 59395 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/365. Склад електродного покриття / Рюмін В. В. , Солнцев Л. О. , Рюмін Г. В. , Іванченко В. М. , Левицький Є. Л. – № 99126723; заявл. 10.12.1999; опубл. 15.09.2003, Бюл. № 9. – 3 с.

142.Пат. 89265 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/368. Порошковий дріт для мокрого підводного зварювання високолегованих хромонікелевих сталей /



Ющенко К. А. , Фадеева Г. В. , Каховський Ю. М. , Максимов С. Ю. , Супрун С. О. – № а2008804077; заявл. 310.03.2008; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1. – 9 с.

143. Пат. 41190 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/30. Склад порошкового електрода / Шевченко О. В. , Донченко Є. І. , Лисак В. К. . – № u200814105; заявл. 08.12.2008; опубл. 12.05.2009, Бюл. № 9. – 2 с.

144. А. с. 1358254 СССР, МПК<sup>4</sup> В 23 К 35/368. Порошковая проволока для подводной резки / М. Е. Данченко, И. М. Савич, Н. В. Головки (СССР). – № 4044227 / 27 ; заявл. 28.03.86 ; опубл. 09.02.95, Бюл. № 4. – 3 с.

145. Пат. 71039 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/22, 35/36. Склад порошкового дроту / Походня І. К. , Шлепаков В. М. , Науменко С. М. . – № 2002053974; заявл. 15.05.2002; опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11. – 3 с.

146. Пат. 2071895 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> В 23 К 35/00. Состав шихты электродного покрытия / Мурзин В. В. , Руссо В. Л. , Марков С. П. , Михайлов А. В. ; патентообладатель Санкт – Петербургский государственный морской технический университет. – № 95104655/08 ; заявл. 03.04.1995 ; опубл. 20.01.1997. – 3 с.

147. А. с. 1549706 СССР, МКИ<sup>5</sup> В 23 К 35/365. Электрод для ручной дуговой сварки / В. В. Мурзин, В. Л. Руссо, В. Р. Евсеев, Ю. А. Узилиевский (СССР). – № 4415949 / 31-27 ; заявл. 09.03.88; опубл. 15.03.90 ; Бюл. № 10. – 3 с.

148. Пат. 60617 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/36. Склад электродного покриття / Рюмін Г. В. , Рюмін В. В. , Данильченко Б. В. , Будьонний М. М. , Левицький Ю. Л. , Дорош С. І. , Солдатов О. І. . – № 2003010334; заявл. 14.01.2003; опубл. 15.10.2003, Бюл. № 10. – 3 с.

149. Петров Г. Л. Сварочные материалы : учебное пособие для вузов / Г. Л. Петров. – Л. : Машиностроение, 1972. – 280 с.

150. Лидин Р. А. Химические свойства неорганических веществ / Р. А. Лидин, В. А. Молочко, Л. Л. Андреева. – М. : Химия, 1997. – 480 с.

151. Рабинович В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Химия, 1978. – 392 с.

152. Shlepakov, V. N. Kinetics of gas generation in flux-cored wire welding / V. N. Shlepakov, S. A. Suprun, A. S. Kotel'chuk // Intern. Inst. of Welding; Doc. XII – 1046-87. – 1987. – P. 15

153. Голякевич А. А. Повышение эффективности защиты при применении самозащитных порошковых проволок / А. А. Голякевич, А. С. Котельчук // Сборник тезисов докладов II Конференции молодых ученых и специалистов, 16-20 мая 1988 г. – К. : ИЭС им. Е. О. Патона, 1988. – С. 49.

154. Котельчук А. С. Разработка порошковой проволоки для сварки вертикальных стыковых соединений низколегированных сталей с принудительным формированием швов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 / Котельчук А. С. – Киев, 1999. – 22 с.

155. Математическое моделирование систем и процессов : учебное пособие / сост. : П. А. Гавриш, Л. В. Васильева. – Краматорск : ДГМА, 2007. – 100 с.

156. Боровиков, В. Statistica : искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В. Боровиков. – СПб. : Питер, 2001. – 656 с.

157. Пат. 94862 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/28, 35/368, 35/00. Шихта порошкової стрічки / Малінов В. Л. . – № а201007023; заявл. 07.06.2010; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11. – 3 с.

158. Пат. 93865 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/40. Склад порошкового дроту / Жаріков С. В. , Гринь О. Г. , Богуцький О. А. , Недодай Р. С. – № u201401543; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 20. – 4 с.

159. Подгаецкий В. В. Сварочные шлаки / В. В. Подгаецкий. – К. : Наукова думка, 1964. – 76 с.

160. Подгаецкий В. В. О строении жидких сварочных шлаков / В. В. Подгаецкий, В. И. Галинич // Автоматическая сварка. – 1981. – №7. – С. 36-45.

161. Жариков С. В. Расчет состава самозащитной порошковой проволоки для наплавки штампового инструмента / С. В. Жариков, В. М. Карпенко, С. Г. Плис // Вісник ДДМА. – Краматорськ, 2006. – № 2 (4).

– С. 92-95.

162.Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. – М. : Наука, 1965. – 390 с.

163.Тарарычкин И. А. Статистические методы обеспечения качества продукции сварочного производства : монография / И. А. Тарарычкин. – Луганск : ВНУ им. В. Даля, 2002. – 336 с.

164.Пат. 76962 Україна, МПК<sup>7</sup> В 23 К 35/40. Склад самозахисного порошкового дроту / Гринь О. Г., Жаріков С. В., Гринь В. О. – № u201207545; опубл. 25.01.2013, Бюл. № 2. – 4 с.

165.Маркова Е. В. Планирование эксперимента в условиях неоднородностей / Е. В. Маркова, А. Н. Лысенков. – М. : Наука, 1973. – 219 с.

166.Серенко А. Н. Количественная оценка склонности наплавочных материалов к образованию отколов / А. Н. Серенко, В. А. Муратов, А. В. Почепцов, А. Д. Размышляев // Сварочное производство. – 1970. – № 6. – С. 3-5.

167.Теория сварочных процессов : учебник для вузов / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров и др. / Под. ред. В. В. Фролова. – М. : Высшая школа, 1988. – 559 с.

168.Карпенко В. М. Выбор температуры предварительного подогрева при наплавке штампов / В. М. Карпенко, Д. С. Кассов // Сварочное производство. – 1970. – №1. – С. 24-26.

169.Узлов И. Г. Влияние параметров микроструктуры колесной стали на её вязкие свойства / И. Г. Узлов, А. И. Бабченко, Ж. А. Дементьева, А. А. Кононенко, А. Л. Сафронов // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр. – Дніпропетровськ : ІЧМ НАН України, 2007. – Вип. 14. – С. 202-210.

170.Болховитинов Н. Ф. Величина зерна и свойства стали / Н. Ф. Болховитинов. – М. : Государственное научно – техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1943. – 168 с.

## Приложение А

Таблица A1 – Анализ плана для трех моделей

ANOVA; Var.:O (Spreadsheet O2.sta)  
4 Factor mixture design; Mixture total=1,, 15 Runs  
Sequential fit of models of increasing complexity

Model	SS	df	MS	SS	df	MS	F	p	R-Sqr	R-Sqr
Linear	0,000072	3	0,000024	0,000094	11	0,000009	2,806	0,089167	0,433551	0,279065
Quadratic	0,000081	6	0,000014	0,000013	5	0,000003	5,219	0,045080	0,922010	0,781628
<b>Special Cubic</b>	0,000013	4	0,000003	0,000000	1	0,000000	1364,692	0,020299	0,999986	0,999800
Total Adjusted	0,000166	14	0,000012							

Таблица A2 – Дисперсионный анализ кубической модели

Overall Fit of Model; Var.: O (Spreadsheet O2.sta)  
4 Factor mixture design; Mixture total=1,, 15 Runs

Source	SS	df	MS	F	p
Model	0,000166	13	0,000013	1385,008	0,020666
Total Error	0,000000	1	0,000000		
Total Adjusted	0,000166	14	0,000012		

Таблица A3 – Коэффициенты модели и статические характеристики

Coeffs (recoded comps); Var.:O; R-sqr=1,; Adj,9998 (Spreadsheet O2.sta)  
4 Factor mixture design; Mixture total=1,, 15 Runs  
DV: O; MS Residual=0

Factor	Coeff.	Std.Err.	t(1)	p	-95,%	+95,%
(A)CaCO <sub>3</sub>	0,021901	0,000049	449,5695	0,001416	0,021282	0,022520
(B)MgCO <sub>3</sub>	0,019801	0,000049	406,4624	0,001566	0,019182	0,020420
(C)Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,021401	0,000049	439,3076	0,001449	0,020782	0,022020
(D)Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,024301	0,000049	498,8383	0,001276	0,023682	0,024920
AB	-0,002620	0,000238	-11,0198	0,057613	-0,005642	0,000401
AC	-0,002620	0,000238	-11,0199	0,057612	-0,005642	0,000401
AD	-0,003220	0,000238	-13,5431	0,046922	-0,006242	-0,000199
BC	-0,004420	0,000238	-18,5889	0,034214	-0,007442	-0,001399
BD	0,003380	0,000238	14,2123	0,044720	0,000358	0,006401
CD	0,042580	0,000238	179,0552	0,003555	0,039558	0,045601
ABC	-0,025553	0,001575	-16,2205	0,039198	-0,045570	-0,005536
ABD	0,042922	0,001575	27,2459	0,023355	0,022905	0,062939
ACD	-0,078029	0,001575	-49,5287	0,012852	-0,098047	-0,058011
BCD	-0,070806	0,001576	-44,9391	0,014164	-0,090826	-0,050786

## Приложение Б

Таблица Б1 – Анализ плана для трех моделей

ANOVA; Var.:N (Spreadsheet Azot.sta)  
4 Factor mixture design; Mixture total=1., 15 Runs  
Sequential fit of models of increasing complexity

Model	SS	df	MS	SS	df	MS	F	p	R-Sqr	R-Sqr
Linear	0,000092	3	0,000031	0,000003	11	0,000000	116,8554	0,000000	0,969577	0,961280
Quadratic	0,000002	6	0,000000	0,000001	5	0,000000	1,3330	0,384988	0,988297	0,967231
Special Cubic	0,000001	4	0,000000	0,000000	1	0,000000	185,0790	0,015067	0,999984	0,999779
Total Adjusted	0,000095	14	0,000007							

Таблица Б2 – Дисперсионный анализ кубической модели

Overall Fit of Model; Var.: N (Spreadsheet Azot.sta)  
4 Factor mixture design; Mixture total=1., 15 Runs

Source	SS	df	MS	F	p
Model	0,000095	13	0,000007	1872,519	0,011213
Total Error	0,000000	1	0,000000		
Total Adjusted	0,000095	14	0,000007		

Таблица Б3 – Коэффициенты модели и статические характеристики

Coeffs (recoded comps); Var.:N; R-sqr=1.; Adj.:9998 (Spreadsheet Azot.sta)  
4 Factor mixture design; Mixture total=1., 15 Runs  
DV: N; MS Residual=0

Factor	Coeff.	Std.Err.	t(1)	p	-95,%	+95,%
(A)CaCO <sub>3</sub>	0,036300	0,000039	937,4677	0,000679	0,035808	0,036792
(B)MgCO <sub>3</sub>	0,032500	0,000039	839,3312	0,000758	0,032008	0,032992
(C)Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,037700	0,000039	973,6271	0,000654	0,037208	0,038192
(D)Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,028000	0,000039	723,1153	0,000880	0,027508	0,028492
AB	-0,004784	0,000189	-25,3097	0,025140	-0,007185	-0,002382
AC	0,002016	0,000189	10,6675	0,059505	-0,000385	0,004418
AD	0,001816	0,000189	9,6093	0,066013	-0,000585	0,004218
BC	-0,004784	0,000189	-25,3094	0,025140	-0,007185	-0,002382
BD	-0,001784	0,000189	-9,4375	0,067206	-0,004185	0,000618
CD	0,002616	0,000189	13,8407	0,045916	0,000214	0,005018
ABC	0,022296	0,001252	17,8059	0,035716	0,006386	0,038206
ABD	0,001227	0,001252	0,9801	0,506398	-0,014683	0,017138
ACD	-0,019720	0,001252	-15,7476	0,040372	-0,035631	-0,003809
BCD	0,016080	0,001252	12,8398	0,049482	0,000167	0,031993

## Приложение В



Таблица В1 - Результаты проведения эксперимента

№ опыта	$I_{св}, A$	$U_{д}, B$	$\beta$	$K_3, \%$	$\alpha_p, г/А·ч$	$\alpha_n, г/А·ч$	$\Psi, \%$
1	350	28	4	0,37	20,7	18,8	8,2
2	450	28	4	0,37	23,2	20,8	10,6
3	350	32	4	0,37	20,7	18,6	10,0
4	450	32	4	0,37	20,8	19,4	6,5
5	400	30	3	0,34	18,5	17,7	6,7
6	400	30	5	0,34	16,6	16,7	7,9
7	400	30	3	0,4	21,4	17,8	8,8
8	400	30	5	0,4	19,5	16,8	10,1
9	400	30	4	0,37	21,9	20,5	7,8
10	350	30	4	0,34	19,8	19,3	7,4
11	450	30	4	0,34	20,8	20,7	6,6
12	350	30	4	0,4	22,4	19,3	9,3
13	450	30	4	0,4	24,0	20,7	9,1
14	400	28	3	0,37	20,5	18,1	7,4
15	400	32	3	0,37	18,7	16,1	9,6
16	400	28	5	0,37	17,9	15,9	11,9
17	400	32	5	0,37	17,4	16,3	7,6
18	400	30	4	0,37	21,8	20,4	7,8
19	350	30	3	0,37	19,1	16,8	9,7
20	450	30	3	0,37	20,6	17,5	6,4
21	350	30	5	0,37	17,3	15,2	8,3
22	450	30	5	0,37	18,5	17,2	10,5
23	400	28	4	0,34	20,7	20,3	8,0
24	400	32	4	0,34	19,5	19,5	6,9
25	400	28	4	0,4	23,6	20,3	10,2
26	400	32	4	0,4	22,4	19,5	9,1
27	400	30	4	0,37	22,0	20,6	7,9

## Приложение Г

УТВЕРЖДАЮ:

Зам. технического директора

ОАО «Энергомашспецсталь»



В.Ю. Станков

2014 г.

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы  
Жарикова Сергея Владимировича

15.12.2014г.

г. Краматорск

По теме диссертационной работы соискателя кафедры ОиТСП ДГМА Жарикова Сергея Владимировича были произведены производственные испытания самозащитной экзотермической порошковой проволоки ППЭ - 8ХЗГСВ2Ф в оболочке из стали 08кп диаметром 4 мм. По результатам испытаний опытной партии наплавочной проволоки получена повышенная на 45-50 %, по сравнению с самозащитной порошковой проволокой ВЕЛТЕК-Н480С, стойкость наплавленного инструмента, которая составила 30 тыс. штампоударов при вырубке деталей толщиной 6 -12 мм. При наплавке наблюдалась высокая стабильность процесса, хорошее формирование наплавленного металла, равномерность плавления сердечника и оболочки проволоки, хорошая отделимость шлаковой корки. Трещин, пор и шлаковых включений в наплавленном металле не обнаружено.

Начальник ОКП

А.И. Лобанов.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор, проректор з науково -  
педагогічної та методичної роботи

  
А.М. Фесенко

«16» 12 2014 р

## АКТ

### впровадження в учбовий процес результатів дисертаційної роботи

Даний акт підтверджує, що результати дисертаційної роботи Жарікова Сергія Володимировича на тему «Розробка самозахисного порошкового дроту з екзотермічною сумішшю для наплавлення штампів холодного деформування» впроваджені на кафедрі «Обладнання та технологій зварювального виробництва» Донбаської державної машинобудівної академії в дисципліни: «Спеціальні методи зварювання», «Теорія процесів зварювання», «Напилення та наплавлення» для студентів спеціальності 7.0505041 «Технологія та устаткування зварювання».

Зав. кафедрою «ОіТЗВ»,  
д-р техн.наук, проф.



Н.О. Макаренко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор, проректор з науково -  
педагогічної та методичної роботи

А.М. Фесенко

«10» 02 2015 р

## АКТ

### впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи

Даний акт підтверджує, що результати дисертаційної роботи Жарікова Сергія Володимировича на тему «Удосконалення самозахисного порошкового дроту для наплавлення штампів шляхом введення екзотермічної суміші в наповнювач» впроваджені на кафедрі «Технологій та обладнання ливарного виробництва» Донбаської державної машинобудівної академії в дисципліні: «Структурні і фазові перетворення при нагріві і охолодженні металів» для студентів спеціальності 7.0505041 «Технологія та устаткування зварювання».

Зав. кафедрою «Технологій та обладнання  
ливарного виробництва»  
д.х.н., проф.



М.А. Турчанін