

На правах рукописи



Ильященко Дмитрий Павлович

**ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ИНВЕРТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Юргинском технологическом институте (филиале)
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», г. Юрга.

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Чинахов Дмитрий Анатольевич**

Официальные оппоненты:

Коробов Юрий Станиславович – доктор технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры «Технология сварочного производства»

Крюков Роман Евгеньевич – кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», доцент кафедры «Материаловедение, литейное и сварочное производство»

Ведущая организация:

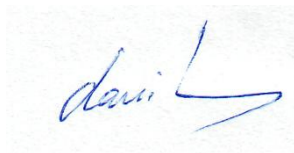
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово

Защита состоится « 29 » сентября 2017 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д003.038.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) по адресу: 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, д. 2/4, e-mail: dvi@ispms.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФПМ СО РАН по адресу: 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, д. 2/4, а также на официальном сайте: <http://www.ispms.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор



В.И. Данилов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Анализ номенклатуры сварочного оборудования, выпускаемого российскими и зарубежными производителями, показывает, что до 80 % ее наименований представлено современными источниками питания, реализующими высокочастотное преобразование энергии. Как правило, это инверторные источники питания, обладающие быстродействием в управлении параметрами режима сварки (скорость нарастания тока короткого замыкания и скорость его спада; соотношение значений тока горения дуги и тока короткого замыкания и т. д.). Однако в настоящее время нет комплексной методики, с использованием которой можно объективно оценить сварочные свойства оборудования и спрогнозировать свойства неразъемного соединения, выполненного с использованием данного типа источника питания.

Повышение эффективности новых источников питания для ручной дуговой сварки и оценка их влияния на тепломассоперенос, структуру и свойства неразъемных соединений является актуальной научно-исследовательской задачей.

Степень разработанности темы исследования. В России и за рубежом проводились работы такими учеными, как: В.С. Милютин, В.М. Ильюшенко, Г.А. Бутаков, Э.А. Гладков, В.М. Бардин, J. Slania, Ю.Н. Сараев и др., посвященные вопросам стабильности процесса сварки при использовании инверторных источников питания. Однако динамические свойства данных источников питания до сих пор остаются малоизученными. Сказанное в полной мере относится к задачам по анализу характеристик тепломассопереноса при дуговой сварке плавящимся электродом, а это требует проведения комплексных теоретических и экспериментальных исследований процессов сварки (плавление, перенос электродного металла и кристаллизация металла шва из расплава при формировании сварных соединений и наплавленных покрытий).

Результатом проводимых исследований будет установление зависимости между характеристиками тепломассопереноса капель электродного металла, теплосодержанием сварочной ванны и структурой сварного шва, физико-механическими и эксплуатационными свойствами сварных соединений металлов, что позволит сформулировать рекомендации для повышения эксплуатационных свойств сварных металлоконструкций при использовании инверторных выпрямителей.

Под динамическими свойствами источников питания понимают изменение во времени основных энергетических параметров режима сварки, происходящее в процессе плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну, в пределах одного сварочного микроцикла.

Цель работы – оценка влияния динамических свойств инверторных источников питания на стабильность плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну как основных показателей тепломассопереноса, влияющих на структуру и механические свойства формируемых неразъемных соединений.

Для достижения поставленной цели определены следующие основные **задачи**:

1. Экспериментально исследовать влияние скорости изменения основных энергетических параметров в пределах одного микроцикла режима сварки источника питания на стабильность переноса капель электродного металла и их размер.
2. Разработать методику определения геометрических размеров переносимых капель электродного металла в зависимости от параметров режима ручной дуговой сварки покрытыми электродами.
3. Разработать методику получения образцов, предназначенных для оценки степени перехода химических элементов из покрытых электродов в сварной шов, шлаковую корку, а также в твердую и газовую составляющую сварочного аэрозоля.
4. Исследовать влияние скорости изменения основных энергетических параметров в пределах одного микроцикла режима сварки источника питания на микроструктуру, химический состав металла шва и механические свойства сварных соединений.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Доказано, что увеличение скорости изменения основных энергетических параметров в пределах одного микроцикла режима сварки источника питания обеспечивает повышение стабильности характеристик тепломассопереноса переносимых капель и уменьшение их размеров.
2. Разработана методика определения геометрических размеров переносимых электродных капель в зависимости от длительности коротких замыканий, позволяющая дать количественную оценку характеристикам переноса электродного металла и энергетическому воздействию на металл свариваемых изделий.
3. Показано, что снижение размеров переносимых капель и сокращение периода переноса способствует уменьшению на 25 % ширины температурных полей, в том числе площади ЗТВ на 15 %, средней ширины ЗТВ на 36 %, интенсивности теплового излучения на 37 %.
4. Разработана методика получения образцов, предназначенных для оценки перехода химических элементов из покрытых электродов в сварной шов, шлаковую корку, в твердую и газовую составляющую сварочного аэрозоля, позволяющая сократить время и материальные затраты на подготовку образцов по сравнению со стандартной до 8 раз. Установлен эффект увеличения массовой доли легирующих элементов, при их переходе из покрытого электрода в металл шва, в зависимости от скорости изменения основных энергетических параметров в пределах одного микроцикла режима сварки инверторного источника питания.
5. Установлено, что улучшение динамических характеристик источника питания, определяемых скоростями изменения основных энергетических параметров в пределах одного сварочного микроцикла, позволяет снизить структурную неоднородность в зоне неразъемного соединения, повысить их механические характеристики, уменьшить ширину и площадь ЗТВ.

Теоретическая значимость работы. Диссертационная работа вносит существенный вклад в развитие представлений о связи энергетических параметров инверторного источника питания с повышением стабильности плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну, которые определяют структурно-фазовый состав и механические свойства формируемых неразъемных соединений.

Практическая значимость работы. Результаты исследований легли в основу разработанных технологических рекомендаций, которые позволяют подобрать оборудование для эффективного решения производственных задач, ресурсоэффективного использования электроэнергии и материалов электродов и повысить эксплуатационные свойства сварных соединений.

Результаты диссертационной работы используются при организации и осуществлении учебного процесса студентов ЮТИ ТПУ, обучающихся по направлению 15.03.01 «Машиностроение», профиль «Оборудование и технология сварочного производства», при изучении дисциплин «Технологическое оборудование для сварки и резки», «Технология сварки плавлением и термической резки».

Методология и методы исследования. Работа выполнена с применением метода исследования - оптической микроскопии (микроскопы: Neophot-21 и Olympus GX-71, цифровая камера Genius VileCam). Механические свойства определяли по ГОСТ 6996–66 (машина испытательная универсальная ЦДМУ-30, маятник копра МК-30), химический состав наплавленного металла – по ГОСТ 18895–97 (дифракционный спектрограф ДФС-3). Осциллографирование тока в сварочной цепи и напряжения между электродом и изделием производили с помощью осциллографа «АКИП-4122/1V» и источников питания для дуговой сварки «Nebula-315» и «ВД-306»). Тепловые поля регистрировали посредством тепловизора ThermoCAM P65HS и программы ThermoCAM Researcher). Макрошлифы сварного шва обрабатывали с использованием программы КОМПАС-3D V16. Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась методами дисперсионного и регрессионного анализов, с использованием пакетов Microsoft Office Excel.

Положения, выносимые на защиту:

1. Повышение скорости изменения основных энергетических параметров (скорости нарастания тока короткого замыкания и скорости его спада, соотношение значений тока горения дуги и тока короткого замыкания и т. д.) в пределах одного микроцикла режима сварки источника питания изменяет характеристики тепломассопереноса, а именно увеличивает частоту переноса капель электродного металла, уменьшает размер переносимых капель в сварочную ванну, сокращает длительность их пребывания на торце электрода под действием высокой температуры сварочной дуги и длительность коротких замыканий.

2. Методика определения геометрических размеров переносимых электродных

капель в зависимости от длительности коротких замыканий, позволяет дать количественную оценку характеристикам переноса электродного металла и энергетическому воздействию на металл свариваемых изделий. Рекомендуется для практического применения.

3. С использованием разработанной методики получения образцов для оценки степени перехода химических элементов из покрытых электродов в сварной шов, шлаковую корку, а также в твердую и газовую составляющую сварочного аэрозоля, позволяющей сократить время и материальные затраты на подготовку образцов по сравнению со стандартной в 8 раз, установлено увеличение массовой доли легирующих элементов, при их переходе из покрытого электрода в металл шва, в зависимости от скорости изменения основных энергетических параметров одного микроцикла режима сварки инверторного источника питания, по сравнению с диодным выпрямителем.

4. Повышение динамических свойств источников питания, определяемых скоростями изменения основных энергетических параметров в пределах одного сварочного микроцикла, позволяет снизить структурную неоднородность в зоне неразъемного соединения и повысить его механические характеристики.

Достоверность результатов проведенных исследований и выводов. Достоверность полученных результатов при решении поставленных в диссертационной работе задач обеспечивалась использованием стандартных методов и методик экспериментальных и теоретических исследований, применением современных серийных приборов, аккредитованных лабораторий, а также современного технологического оборудования и компьютерной техники.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» – г. Томск (2003–2008 гг.), Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» – г. Юрга (2003–2016 гг.), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы электрометаллургии, сварки, качества» – г. Новокузнецк (2006 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Металлургия: новые технологии, управление, инновации и качество» – г. Новокузнецк (2007–2009 гг.), 8-й Международной научно-практической конференции «Качество – стратегия XXI века» – г. Томск (2012 г.), Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» – г. Томск (2016 г.).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 публикациях, из них 6 статей в журналах, рекомендуемых ВАК («Сварка и диагностика», «Сварочное производство», «Дефектоскопия», «Технология металлов», «Энергобезопасность и энергосбережение» и др.), и 5 статей в журналах из списка Scopus (Welding International, IOP Conference Series, Materials Science Forum и др.), и

1 свидетельстве об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад соискателя. Автору принадлежит постановка задач исследования, выполнение теоретических исследований, участие в экспериментальных исследованиях, обработка, обобщение и анализ полученных результатов, формулирование выводов и положений, выносимых на защиту.

Связь работы с Государственными программами и НИР. Проект «Развитие теории физико-химических процессов, протекающих в дуговом разряде и расплавленном металле сварочной ванны» в рамках реализации аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)», Рег. №2.1.2/1949; Грант РФФИ 12-08-09213 моб-з на участие в XIII Международной научно-технической конференции «Прогрессивная техника и технология 2012» (Украина).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 157 наименований, и 8 приложений. Основной текст диссертации содержит 137 страниц, в том числе 36 рисунков и 24 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, показана степень ее разработанности, определены цель и задачи, решение которых необходимо для ее достижения, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту, описаны методологии и методы исследования, представлена структура диссертации.

В первой главе изложены результаты аналитического обзора литературных источников по темам: повышение эффективности ручной дуговой сварки покрытыми электродами; эффективность перехода химических элементов из сварочных материалов; увеличение производительности изготовления металлоконструкций РД, подконтрольных Ростехнадзору.

Эксплуатационная надежность сварных соединений металлоконструкций, используемых в различных отраслях промышленности, существенно влияет на безопасность функционирующего производства.

Выполненный в работе анализ процесса РД позволил установить, что:

- 1) повышение эксплуатационных свойств неразъемных соединений можно обеспечить путем улучшения их структурно-фазового состава, а также увеличения количества легирующих элементов при их переходе из покрытых электродов в металл шва;
- 2) минимизировать потери легирующих элементов в шлаковую и газовую составляющие можно через управляемое тепловложение в расплавленный электродный металл и металл сварочной ванны, что достигается за счет применения при РД источников питания инверторного типа, имеющих более высокие динамические свойства по сравнению с обычными сварочными выпрямителями диодного типа.

Намечены направления теоретических и экспериментальных исследований по повышению эффективности РД. Сформулированы цель и задачи работы.

Во второй главе описано используемое оборудование для проведения экспериментальных исследований.

Для оценки размеров переносимых капель электродного металла разработана математическая формула (1), позволяющая оценить радиус переносимых капель электродного металла в зависимости от времени короткого замыкания при переходе капли с торца электрода в сварочную ванну, а также дать количественную оценку характеристикам переноса электродного металла и энергетическому воздействию на металл свариваемых изделий*.

$$R = \sqrt[3]{-\frac{1}{27} \cdot c^3 + \left(\vartheta - \frac{c}{6}\right)} - \sqrt{\frac{2}{27} \cdot c^3 + \frac{1}{4} \left(\vartheta - \frac{c}{6}\right) - \frac{1}{27^2} \cdot c^6} - \frac{c}{3}, \quad (1)$$

где $c = \frac{-\pi \cdot \gamma \cdot r_0^2}{4a \cdot \tau_{к.з.}^3 \cdot 10^3}$; $\vartheta = \frac{-3a \cdot \tau_{к.з.}^3 \cdot 10^3}{8 \cdot \pi \cdot \gamma}$; $\tau_{к.з.}$ – время пребывания капли на торце электрода, с; a – коэффициент $0,33 \cdot 10^{-4}$ г/с³; π – математическая константа, равная отношению длины окружности к длине её диаметра, $\pi \approx 3,14$; γ – плотность жидкого металла, г/мм³; R – радиус кривизны поверхности капли, мм; r_0 – радиус электродного стержня, мм.

Таким образом, формула (1) показывает, что чем меньше короткое замыкание, тем меньше радиус капли переносимого электродного металла. В работах И.К. Походни установлено, что при увеличении силы тока уменьшаются размеры переносимых капель электродного металла и увеличивается содержание Mn и Si в наплавленном металле. Однако в литературе отсутствуют данные о количественном составе легирующих элементов, переходящих из электродов в наплавленный металл, шлаковую корку, а также в твердую и газовую составляющие сварочного аэрозоля, в зависимости от размеров переносимых капель электродного металла, определяемых различными скоростями изменения основных энергетических параметров одного микроцикла режима сварки при использовании источников питания разных типов.

Существующие на сегодняшний день различные методики для получения образцов для определения химического состава наплавленного электродного металла несовершенны и имеют свои недостатки: большое количество наплаваемых слоев, нестабильный процесс наплавки и т. д. Учёт этих недостатков позволил сформировать методику, сокращающую время и материальные затраты на подготовку образцов для определения химического состава наплавленного металла по сравнению со стандартной в 8 раз. Примененное техническое решение позволило исключить в процессе наплавки перемешивание электродного и основного металла.

Методика наплавки включала в себя последовательность следующих операций:

- установку в паз медной пластины стержня электрода 2, очищенного от по-

* При выводе формулы приняты следующие допущения: столб дуги неподвижен и соосен с электродом, а капля металла имеет форму сегмента с основанием, равным сечению электрода.

крытия (рисунок 2), для обеспечения токоподвода и стабильного горения дуги;

- проведение наплавки валика на медную пластину 3 с помощью электрода 1;
- извлечение наплавленного валика из паза медной пластины;
- определение химического состава наплавленного металла (метод фотоэлектрического спектрального анализа ДФС-36) и шлака, собранного с поверхности наплавленного металла (рентгенофлюоресцентная спектрометрия).

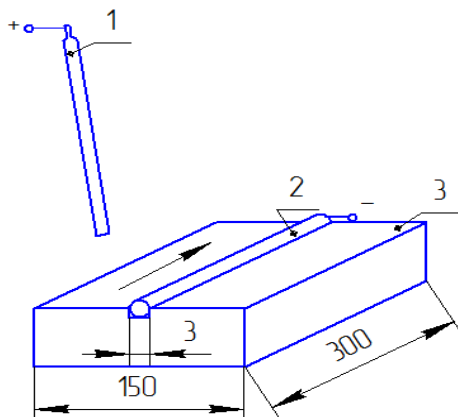


Рисунок 2 – Схема проведения опыта:

- 1 – покрытый электрод;
2 – стержень электрода;
3 – медная пластина

Результаты анализа полученных данных химического состава, согласно разработанной методике, показывают:

1) увеличение массовой доли легирующих элементов в наплавленном металле:

- Si с 0,29 до 0,39 % при использовании ЦЛ-11, с 0,17 до 0,33 % – LB-52U, с 0,25 до 0,33 % – УОНИ-13/55;
- Mn с 2,44 до 2,48 % при использовании ЦЛ-11, с 0,72 до 1,00 % – LB-52U, с 0,94 до 1,1 % – УОНИ-13/55;
- Cr с 11,43 до 11,85 % при использовании ЦЛ-11, с 0,05 до 0,08 % – LB-52U, с 0,94 до 1,1 % – УОНИ-13/55;

2) уменьшение доли оксидов до 5 % (SiO_2 , MnO) в шлаковой фазе при использовании инверторного выпрямителя по сравнению с диодным, что можно объяснить уменьшением размеров переносимых капель расплавленного металла и их меньшим теплосохранением при питании дуги от инвертора, имеющего высокие динамические свойства.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния динамических свойств источников питания на стабильность и тепломассоперенос процесса РД, а также структурно-фазовый состав сварного шва и эксплуатационные свойства сварного соединения.

При исследовании характеристик тепломассопереноса в зависимости от динамических свойств источников питания использовали инверторный выпрямитель Nebula-315, реализующий метод высокочастотного преобразования энергии, и диодный выпрямитель типа ВД-306Э, осуществляющий традиционный метод преобразования энергии, а также наиболее применяемые в нефтегазовой сфере электроды с покрытием (СТО Газпром 2-2.2-136-2007) LB-52U (KOBELCO) и УОНИ-13/55 (ESAB) и

электроды ЦЛ-11, применяемые для сварки аустенитных сталей в атомной энергетике (ПНАЭ Г-7-009-89). Режимы наплавки образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры режимов наплавки

| Тип источника питания – выпрямитель | Марка электродов | Средние значения параметров режима (осциллограф АКИП-4122/1V) | Количество коротких замыканий за время наплавки (12 с) |
|-------------------------------------|------------------|---|--|
| Диодный | LB-52U | Ток $89 \pm 2,7$ А Напряжение $20,8 \pm 0,6$ В Расчетная скорость сварки 0,25 м/мин | 17 |
| Инверторный | | | 22 |
| Диодный | УОНИ-13/55 | Ток $88 \pm 2,7$ А Напряжение $21,5 \pm 0,6$ В Расчетная скорость сварки 0,29 м/мин | 17 |
| Инверторный | | | 22 |
| Диодный | ЦЛ-11 | Ток 86 А Напряжение $24,5 \pm 0,6$ В Расчетная скорость сварки 0,27 м/мин | 12 |
| Инверторный | | | 24 |

Анализ представленных параметров режимов наплавки показывает, что для всех марок электродов и источников питания они находятся примерно на одинаковом уровне. Отличие выявлено только в количестве коротких замыканий, которое увеличивается при переходе от диодного выпрямителя к инверторному.

Осциллограммы тока в сварочной цепи, напряжения между электродом и изделием, записанные при питании дуги от источников питания с различными скоростями изменения основных энергетических параметров одного микроцикла режима, приведенные на рисунке 3, были проанализированы и представлены на рисунке 4.

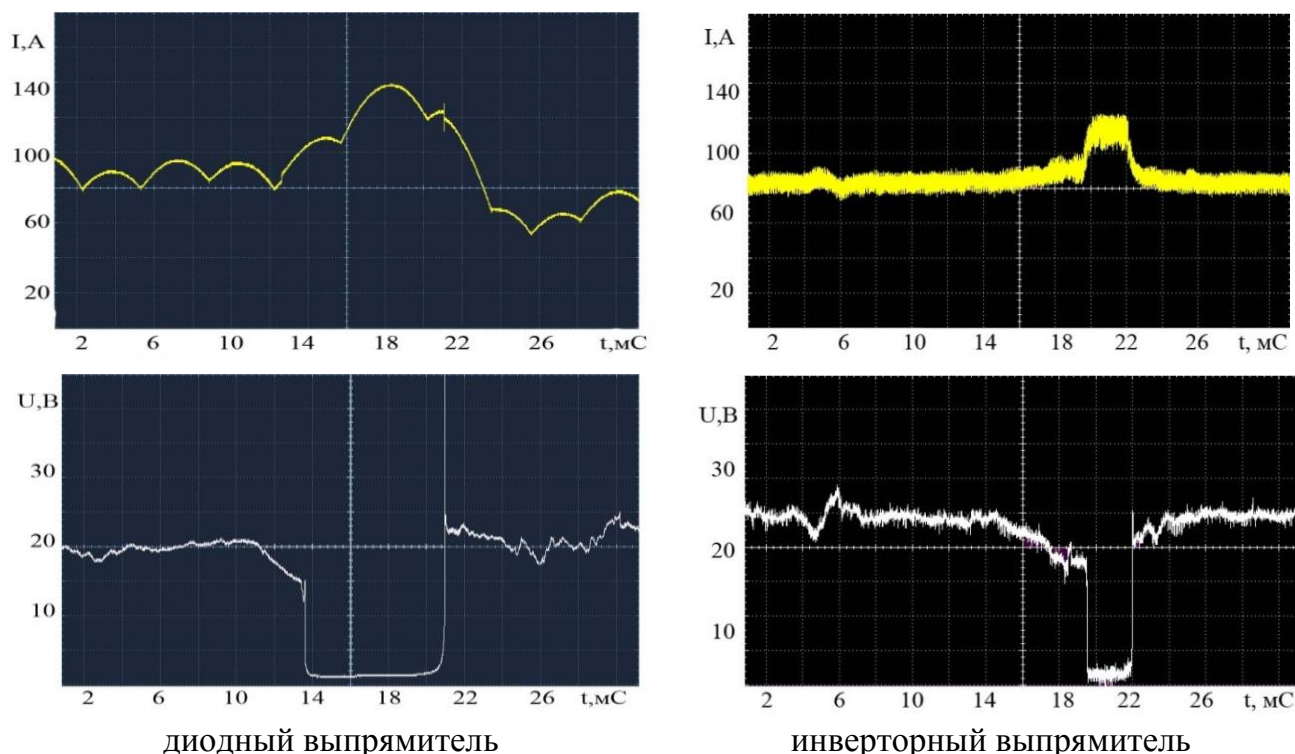


Рисунок 3 – Осциллограммы тока в сварочной цепи и напряжения между электродом и изделием (электроды марки LB-52U, диаметр 3,2 мм)



Рисунок 4 – Диаграммы зависимости усредненного времени короткого замыкания дугового промежутка $\tau_{к.з}$, времени полного цикла образования и переноса капли $T_{к.з}$ от типа источника питания

Различную картину изменения тока и напряжения в процессе сварки можно объяснить с позиций более высоких качественных показателей выпрямленного напряжения. Благодаря различию в частоте преобразования источника инверторного питания частота преобразования может достигать 200 кГц, в то время как диодного выпрямителя – 300 Гц. При этом коэффициент пульсации напряжения инверторного выпрямителя достигает 25 %, а традиционного диодного – 65 %. Процесс сварки при использовании инверторного источника более стабилен, по сравнению с диодным. Отмеченное обстоятельство подтверждается изменением характеристик массопереноса, в том числе частоты и размеров переносимых капель электродного металла, сокращением длительности горения дуги, стабилизацией амплитуды тока короткого замыкания, а также увеличением скоростей нарастания и спада тока короткого замыкания, представленных в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты обработанных осциллограмм тока в сварочной цепи и напряжения между электродом и изделием (рисунок 3)

| Параметры | Тип источника питания – выпрямитель | Марка электрода | | |
|--|-------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | | LB-52U | УОНИ-13/55 | ЦЛ-11 |
| I_{max}, A | Диодный | $131,9 \pm 5,3$ | $130,5 \pm 4,7$ | $132,1 \pm 4,7$ |
| | Инверторный | $123,2 \pm 0,75$ | $123,2 \pm 0,6$ | $123 \pm 1,63$ |
| I_{min}, A | Диодный | $59,6 \pm 4,31$ | $58,1 \pm 5,1$ | $54,9 \pm 4,75$ |
| | Инверторный | $73,1 \pm 0,83$ | $73,3 \pm 0,8$ | $78 \pm 1,06$ |
| $\frac{I_{\delta}}{I_{max}} \rightarrow 1$ | Диодный | 0,67 | 0,67 | 0,67 |
| | Инверторный | 0,72 | 0,72 | 0,72 |
| $V_{нарастания} I_{max},$ кА/с | Диодный | $7,2 \pm 2,6$ | $8,1 \pm 0,8$ | $8,3 \pm 0,27$ |
| | Инверторный | $15,5 \pm 1,63$ | $15,5 \pm 1,6$ | $11,2 \pm 0,28$ |
| $V_{спада} I_{min},$ кА/с | Диодный | $10,3 \pm 2,2$ | $12,3 \pm 2,2$ | $11,2 \pm 0,78$ |
| | Инверторный | $18 \pm 1,1$ | $18 \pm 1,1$ | $19 \pm 1,9$ |

Результаты обработки параметров переноса капель электродного металла, рассчитанных по формуле (1), приведены на рисунке 5. Рассчитанные показатели динамических свойств источника питания (рисунки 4 и 5, таблица 2) свидетельствуют о преимуществах инверторного выпрямителя перед стандартным сварочным выпрямителем,

что выражается в сокращении длительностей коротких замыканий, стабилизации амплитудного значения тока короткого замыкания, увеличении скорости нарастания и спада тока короткого замыкания.

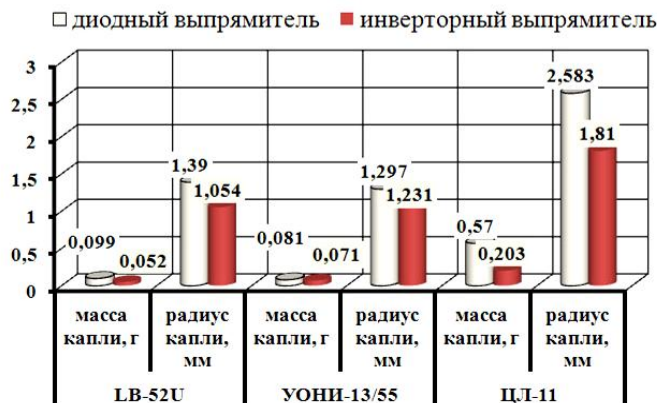


Рисунок 5 – Диаграммы зависимости массы и размеров капель переносимого электродного металла от типа источника питания и марки покрытого электрода

Анализ многочисленных литературных источников позволил установить взаимосвязь показателей стабильности процесса сварки с величиной разбрызгивания электродного и основного металла, что подтверждают исследования по установлению зависимости величины разбрызгивания от силы тока и типа источника питания, представленной на рисунке 6.

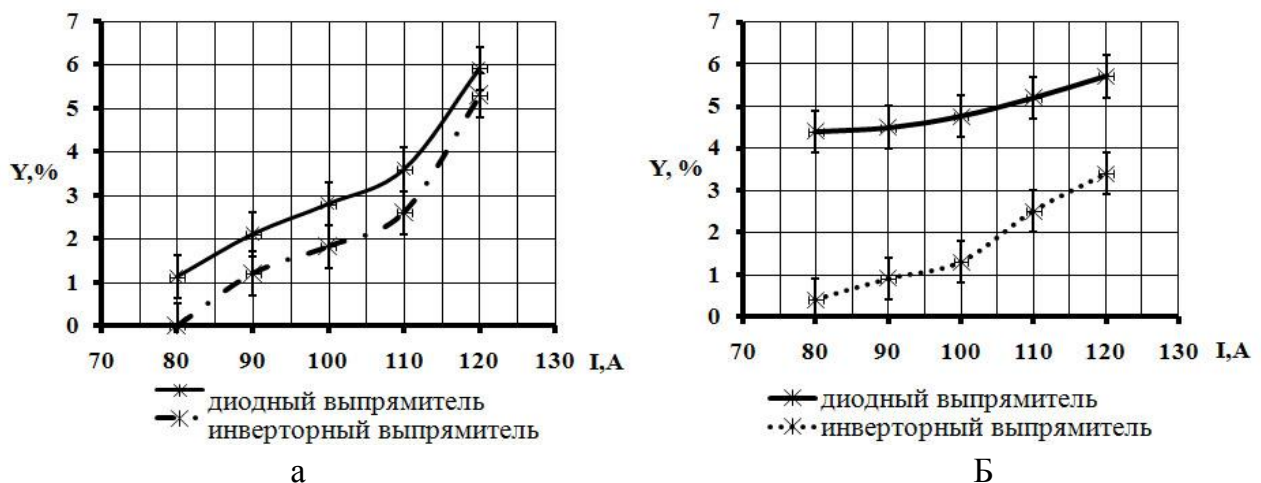


Рисунок 6 – Влияние силы тока и типа источника питания на величину разбрызгивания электродного металла при РД: а – УОНИ-13/55; б – LB-52U

Для подтверждения гипотезы об изменении тепловложения в свариваемое изделие при сварке от источников с различными скоростями изменения основных энергетических параметров одного микроцикла режима была проведена тепловизионная съемка, результаты которой представлены на рисунке 7. Отличия в картинах распределения тепловых полей на поверхности изделия, наплавляемого РД (рисунок 7), заключаются в уменьшении длины и ширины изотерм температурного поля (рисунок 7, а) и подтверждают меньшее теплосодержание расплава сварочной ванны в процессе наплавки от инверторного выпрямителя, что можно объяснить уменьшением времени пребывания капель расплавленного металла на торце электрода и частоты их переноса (рисунки 3 и 4).

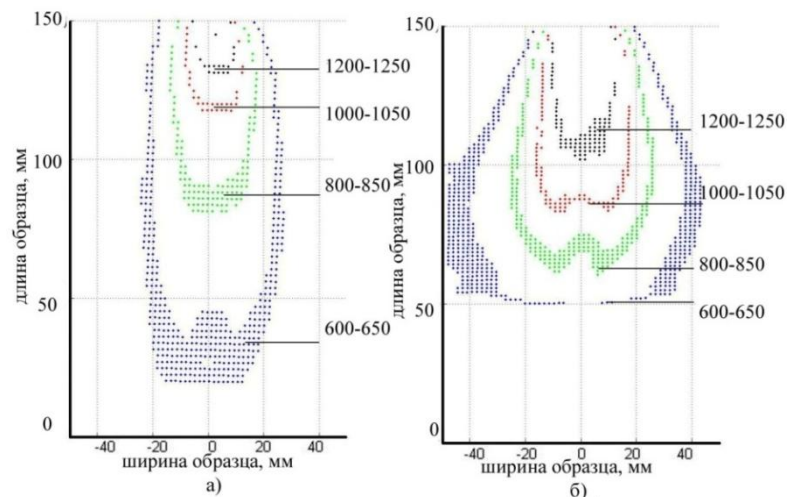


Рисунок 7 – Картины температурных полей на поверхности изделия, наплавляемого РД (электроды LB-52U, диаметр 3,2 мм), параметры режима $I_{св} = 100 \pm 3 \text{ А}$, $U_{св} = 22 \pm 0,6 \text{ В}$, $V_{св} = 13 \dots 14 \text{ см/мин}$: а – инверторный выпрямитель; б – диодный выпрямитель

Расчеты, выполненные аналитическим методом по методике О.Г. Брунова, доказывают, что при сварке от инверторного выпрямителя энергия, затрачиваемая на плавление электродного металла в течение 1 секунды (расчетное значение), в среднем составляет: $Q_k = 1,13 \times 10^7 \text{ Дж}$ ($Q_k = 0,13 \times 10^7 \text{ Дж}$ на каплю), а при сварке от диодного выпрямителя – $Q_k = 1,25 \times 10^7 \text{ Дж}$ ($Q_k = 0,156 \times 10^7 \text{ Дж}$ на каплю), что подтверждается экспериментальными данными, полученными с помощью прибора «Кварц-41 – РАТ-2П» и представленных на рисунке 8.

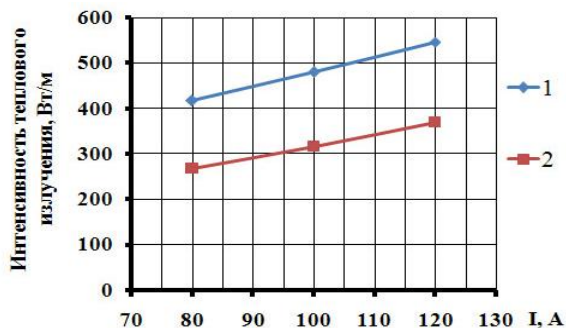


Рисунок 8 – Зависимость интенсивности теплового излучения от величины сварочного тока (электроды марки LB-52U, диаметр 3,2 мм):
1 – диодный выпрямитель;
2 – инверторный выпрямитель

Выдвинутые гипотезы о снижении тепловложения при сварке от источника с высокими скоростями изменения основных энергетических параметров одного микроцикла режима были подтверждены экспериментально в результате комплексного исследования сварных образцов, полученных с использованием различных типов оборудования: инверторного выпрямителя Nebula-315 и диодного выпрямителя типа ВД-306Э. Сварку трубы (соединение С17) размером $159 \times 6 \text{ мм}$ из стали 09Г2С производили электродами: корень – LB-52U ($d = 2,6 \text{ мм}$), сварочный ток $I = 50 \dots 60 \text{ А}$; заполнение – LB-52U ($d = 3,2 \text{ мм}$), сварочный ток $I = 80 \dots 90 \text{ А}$.

Результаты обработки макрошлифов (рисунок 9, а) по методике, реализованной в соответствии с обозначениями (рисунок 9, б), показывают, что при использовании инверторного выпрямителя происходит уменьшение площади ЗТВ на 18 % и ширины ЗТВ на 25 % в сравнении с диодным выпрямителем.

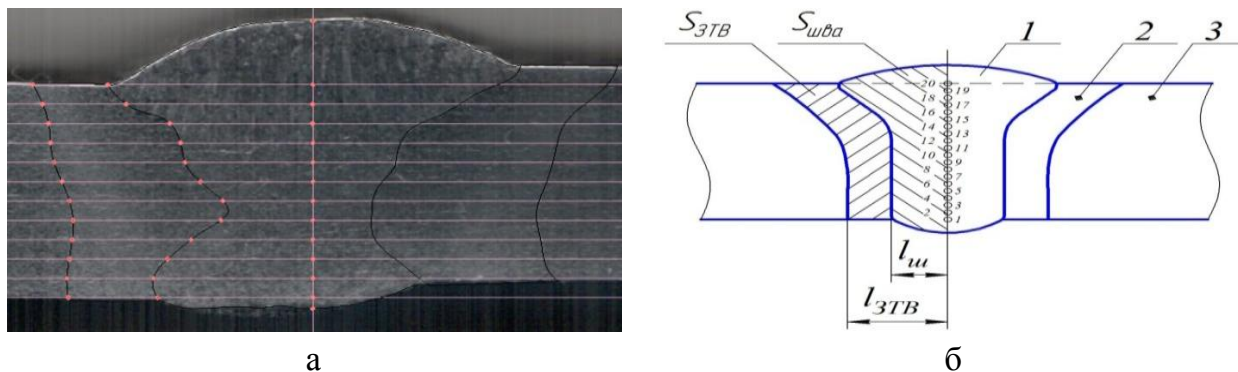


Рисунок 9 – Схема обработки макрошлифов в программе Компас 3D:
 а – сталь 09Г2С; б – схема проведения замеров (шаг между точками – 0,5 мм):
 1 – сварной шов; 2 – ЗТВ; 3 – основного металла; $l_{ш}$ – длина сварного шва;
 $l_{ЗТВ}$ – ширина ЗТВ; $S_{шва}$ – площадь сварного шва; $S_{ЗТВ}$ – площадь ЗТВ

Анализ химического состава сварного шва показал (таблица 3), что при использовании инверторного источника питания происходит меньшее выгорание легирующих элементов (Si до 0,15 %, Mn до 0,28 %), чем при использовании сварочного выпрямителя диодного типа. Установленный факт можно объяснить большей скоростью нарастания сварочного тока с одновременным ограничением величины пикового значения тока короткого замыкания, что обеспечивается высокими динамическими свойствами инверторного выпрямителя (таблица 2).

Таблица 3–Химический состав металла сварных швов,
 выполненных электродами марки LB-52U из трубы $\varnothing 159 \times 6$ мм, сталь 09Г2С

| Источник питания – выпрямитель | Содержание элементов, мас. % | | | | | |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | C | Si | Mn | Cr | Ni | Cu |
| Диодный | $0,10 \pm 0,012$ | $0,52 \pm 0,03$ | $1,03 \pm 0,05$ | $0,03 \pm 0,01$ | $0,05 \pm 0,01$ | $0,03 \pm 0,008$ |
| Инверторный | $0,09 \pm 0,005$ | $0,60 \pm 0,03$ | $1,23 \pm 0,05$ | $0,03 \pm 0,01$ | $0,06 \pm 0,01$ | $0,03 \pm 0,008$ |

Микроструктурные исследования проводились методом оптической металлографии на поперечных шлифах, изготовленных из сварных образцов (рисунок 10). Структура металла сварного шва (рисунок 10, а), выполненного с использованием диодного выпрямителя, имеет неоднородное строение столбчатых дендритов, характерное для литого состояния. Ферритные пластины достигают в длину 1 мм, а в ширину 20 мкм. Межпластиночное пространство занято более мелкими дендритами. При большем увеличении установлено, что ферритные пластины состоят из полиэдрических зерен размерами около $14,5 \pm 0,28$ мкм. Другие фазы и структурные составляющие, кроме феррита, не обнаруживаются, что соответствует составу стержня электрода LB-52U.

Структура наплавленного металла, полученная с использованием инверторного выпрямителя (рисунок 10, б), значительно более однородная. Столбчатый характер проявляется слабо. Длина ферритных пластин не превышает 50 мкм, а толщина достигает, так же как и в предыдущем случае, 20 мкм. Средний размер ферритных зерен, из которых состоят дендриты, $12 \pm 0,64$ мкм.

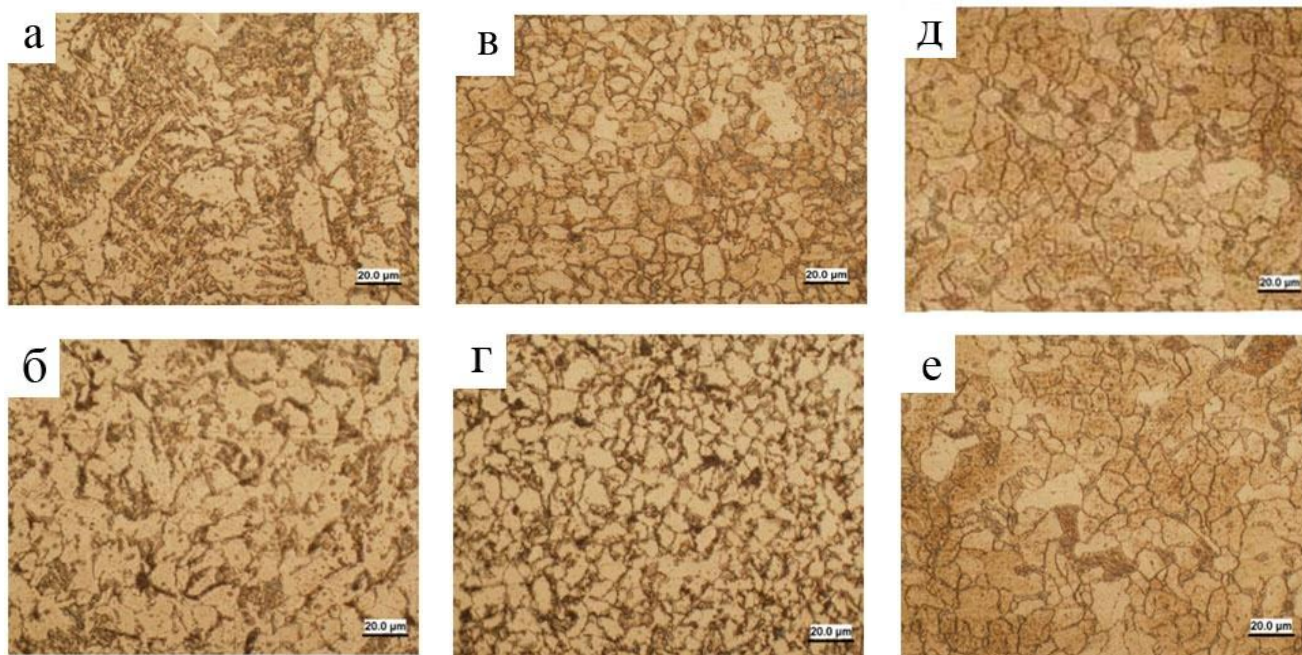


Рисунок 10 – Фотографии образцов микроструктуры (сталь 09Г2С, электрод марки LB-52U): а, б – сварной шов; в, г – ЗТВ; д, е – основного металла (а, в, д – диодный выпрямитель; б, г, е – инверторный выпрямитель)

Переход от наплавленного металла к зоне термического влияния и затем к структуре основного металла происходит плавно, без резких изменений как при использовании диодного выпрямителя (рисунок 10, в), так и инверторного (рисунок 10, г). В обоих случаях зона термического влияния представлена полиэдрическими зёрнами феррита.

В зоне термического влияния сварного соединения (рисунок 10, в) размер ферритного зёрна несколько выше и достигает $10,3 \pm 0,32$ мкм. В структуре присутствует перлит в количестве, соответствующем основному металлу (сталь 09Г2С). Общая ширина зоны термического влияния достигает 2 мм. При использовании инверторного выпрямителя (рисунок 10, г) средний размер зёрна $8,5 \pm 0,34$ мкм. Перлитные включения практически отсутствуют. По-видимому, произошло это из-за диффузии углерода в обезуглероженный наплавленный металл. Ширина зоны термического влияния не превышает 1 мм.

Структура основного металла феррито-перлитная (рисунок 10, д, е). Объемная доля перлита на уровне 10–12 %, что соответствует химическому составу стали 09Г2С. Зёрна феррита полиэдрические с хорошо оформленными, чистыми границами. Таким образом, применение инверторного источника позволяет получить сварное соединение с более однородной и мелкозернистой структурой наплавленного металла. Отличия микроструктур сварного шва, полученные в проведенном исследовании, можно объяснить меньшим теплосодержанием капли расплавленного электродного металла при сварке от инвертора и, следовательно, меньшим выгоранием кремния и марганца (таблица 3). Микроструктурные различия определяют механические свойства сварных соединений, которые представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Механические свойства сварных соединений, выполненных электродами марки LB 52U из трубы Ø159 × 6, сталь 09Г2С

| Источник питания–выпрямитель | Предел временного сопротивления разрыву σ_B , МПа | Угол загиба наружу, во внутрь и на ребро, град. | Ударная вязкость КСУ, Дж/см ² (надрез по центру шва) | |
|------------------------------|--|---|---|----------|
| | | | +20 °С | –40 °С |
| Диодный | 542 ± 1 | более 120 | 197 ± 12 | 182 ± 21 |
| Инверторный | 555 ± 5 | более 120 | 220 ± 2 | 187 ± 11 |

Результаты испытаний, приведенные в таблице 4, показывают повышение значения ударной вязкости сварных соединений, полученных с использованием инверторного выпрямителя, по сравнению с образцами, изготовленными при сварке от диодного выпрямителя, на 3–11 %, в зависимости от температуры испытаний. Достигнутый результат можно объяснить различием микроструктурных составляющих в зонах сварных соединений (рисунок 10), уменьшением длины ферритных пластин до 50 % в металле сварного шва, уменьшением размеров ферритного зерна ЗТВ на 18 % и сокращением протяженности ЗТВ на 25 %.

Исследование влияния размера переносимых капель электродного металла, определяемого динамическими свойствами источников питания, на санитарно-гигиенические характеристики процесса сварки позволило выявить качественные и количественные составляющие сварочного аэрозоля при РД в лабораторных условиях, а также показывает, что использование инверторного выпрямителя снижает концентрацию сварочного аэрозоля до 38 % и марганца до 30 % в сравнении с диодным, следовательно, снижается риск возникновения таких профессиональных заболеваний, как силикоз и к тому же требуется установка вентиляции меньшей мощности.

В четвертой главе представлены рекомендации производителям: покрытых электродов – снижать содержание легирующих элементов (Si, Mn) в обмазке электродов, предназначенных для сварки от инверторных выпрямителей; высоко ответственных металлических конструкций принимать во внимание особенности процесса сварки с применением инверторного источника питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение инверторных источников питания для ручной дуговой сварки покрытыми электродами с большей скоростью изменения основных энергетических параметров одного микроцикла режима (в среднем в 2 раза) по сравнению с традиционно применяемыми диодными выпрямителями обеспечивает повышение стабильности процесса сварки и эффективности теплопереноса, в том числе:

- уменьшение объема переносимых капель в сварочную ванну в среднем на 24 %, что повышает эффективность перехода химических элементов с электрода в металл шва;
- уменьшение средней длительности горения дуги на интервалах плавления

электродов и периода формирования капель электродного металла в среднем на 36 %, что способствует снижению перегрева свариваемого изделия;

- уменьшение разбрызгивания электродного металла до 1,3 %.

2. Разработанная методика определения геометрических размеров переносимых электродных капель с короткими замыканиями, в зависимости от времени короткого замыкания при переходе капли с торца электрода в сварочную ванну, позволяет дать количественную оценку характеристик переноса электродного металла и энергетического воздействия на металл свариваемых изделий.

3. Разработанная методика получения образцов, предназначенных для оценки перехода химических элементов из покрытых электродов в сварной шов, шлаковую корку, в твердую и газовую составляющую сварочного аэрозоля, позволяет сократить время и материальные затраты на подготовку образцов по сравнению со стандартной до 8 раз. С использованием данной методики установлено увеличение массовой доли легирующих элементов при их переходе из покрытого электрода в металл шва, в зависимости от скорости изменения основных энергетических параметров одного микроцикла режима сварки инверторного источника питания, по сравнению с диодным выпрямителем.

4. Установлено, что увеличение скорости (в среднем в 2 раза) изменения основных энергетических параметров одного микроцикла режима сварки при использовании инверторного выпрямителя, по сравнению с традиционно применяемыми диодными выпрямителями, обеспечивает:

- уменьшение теплосодержания капель электродного металла (в среднем на 15 %), что способствует уменьшению ширины температурных полей на поверхности свариваемого изделия на 25 %, площади ЗТВ на 15 %, ширины ЗТВ на 36 %, интенсивности теплового излучения на 37 %;

- улучшение структуры (уменьшение размера зерна наплавленного металла в среднем на 30 % и ЗТВ в среднем на 35 %) и свойств сварного соединения (повышение ударной вязкости на 15 %).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК:

1. **Ильященко, Д.П.** Определение потерь на разбрызгивание металла при использовании различных источников питания / **Д.П. Ильященко, Е.А. Зернин** // Сварочное производство. – 2009. – № 6. – С. 36–40.

2. **Ильященко, Д.П.** Влияние типа источника питания на тепло- и массоперенос при ручной дуговой сварке / **Д.П. Ильященко, Д.А. Чинахов** // Сварка и диагностика. – 2010. – № 6. – С. 26–29.

3. **Ильященко, Д.П.** Сравнительный анализ распределения тепла в изделии при дуговой сварке плавлением / **Д.П. Ильященко, Н.В. Павлов, Д.А. Чинахов** // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011. – № 3. – С. 35–37.

4. **Ильященко, Д.П.** Тепловизионное исследование температурных полей на по-

верхности свариваемого изделия при ручной дуговой сварке покрытыми электродами / **Д.П. Ильященко**, Д.А. Чинахов // Дефектоскопия. – 2011. – № 11. – С. 11–17.

5. **Ильященко, Д.П.** Улучшение санитарно-гигиенических характеристик условий процесса ручной дуговой сварки покрытыми электродами / **Д.П. Ильященко**, Д.А. Чинахов // Технология металлов. – 2013. – № 4 – С. 34–37.

6. Сараев, Ю.Н. Исследование стабильности плавления и переноса электродного металла в процессе дуговой сварки плавящимся электродом от источников питания с различными динамическими характеристиками / Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов, **Д.П. Ильященко** и др. // Сварочное производство. – 2016. – № 12. – С. 3–12.

В зарубежных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:

1. **П'уашченко, D.P.** Chemical composition of welding aerosol in manual coated electrode arc welding / **D.P. П'уашченко**, E.A. Zernin, S.V. Shadskii // Welding International. – 2011. – Vol. 25. – P. 719–721.

2. **П'уашченко, D.P.** Investigating the influence of the power supply type upon the weld joints properties and health characteristics of the manual arc welding // **D.P. П'уашченко**, D.A. Chinakhov / Materials Science Forum. – 2012. – Vol. 704–705. – P. 608–611.

3. **П'уашченко, D.P.** Calculation of the Heat Content of the Electrode Metal Drop-let When Applying Power Supplies for Manual Arc Welding with Different Volt-Ampere Characteristic/ **D.P. П'уашченко**, D.A. Chinakhov, Yu.M. Gotovshchik // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 756. – P. 101–104.

4. Saraev, Y.N. Study of the stability of electrode metal melting and transfer in the process of consumable electrode welding powered by supplies with differing dynamic characteristics / Y.N. Saraev, D.A. Chinakhov, **D.P. П'уашченко**, A.S. Kiselev, A.S. Gardiner, and I.V. Raev // AIP Conf. Proc. – 2016. – № 1783.

5. **П'уашченко, D.P.** Physical Nature of the Processes in Structure Forming, Phase and Chemical Composition of pipe Permanent Joints when MMA Welding / **D.P. П'уашченко** [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 125.

Программа для ЭВМ:

1. **Ильященко Д.П.**, Павлов Н.В. Расчет тепловложения в каплю электродного металла при РДС. Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2015615010 06.05.2015 г.

Подписано к печати 14.07.2017 г. Формат 60x90 1/16
Уч.-изд. л. 1,13. Тираж 100 экз.
Заказ № 147
Отпечатано в типографии ООО «МедиаСфера».
652050, Юрга, ул. Ленинградская, 4.