

На правах рукописи

Деменцев Кирилл Иванович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СВАРОЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ИНВЕРТОРНОГО ТИПА ЗА СЧЕТ МОДУЛЯЦИИ СВАРОЧНОГО ТОКА**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул - 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
КНЯЗЬКОВ Анатолий Федорович

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
МАРКОВ Василий Алексеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
ПИНАЕВ Владимир Георгиевич

Ведущее предприятие – **ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ ТОМСК»**

Защита диссертации состоится « 23 » декабря 2010 г в _____ ч. на заседании диссертационного совета при ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» Д 212.004.01 по адресу:
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке АлтГТУ им. И. И. Ползунова.

Автореферат разослан « » _____ 2010 г.

Ваш отзыв на автореферат (в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью просим направлять в адрес Университета) на имя ученого секретаря диссертационного совета: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, АлтГТУ.
Факс: (3852)290-764, e-mail: yuoshevtsov@mail.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Шевцов Ю.О.

Актуальность работы

Современный уровень развития сварочного оборудования предопределен совершенствованием полупроводниковой элементной базы, принципом миниатюризации, а также повышением требований к технологическим и функциональным возможностям. В настоящее время развитие источников питания для сварки идет по пути совершенствования сварочных преобразователей инверторного типа. Однако с улучшением технико-экономических показателей «инверторов» и расширением их функциональных возможностей, повышению эффективности процессов дуговой сварки отведено второстепенное значение.

Достигнутые результаты в вопросах повышения эффективности процесса ручной дуговой сварки электродами с покрытием (РДС) характеризуются появлением способов сварки модулированным током (СМТ). Большой вклад в развитие модулированных процессов внесли: Зайцев М.П., Петров А.В., Славин Г.А., Заруба И.И., Вагнер А.Ф., Патон Б.Е., Потапьевский А.Г., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н., Ленивкин В.А., Букаров В.А., Ищенко Ю.С., Шигаев Т.Г., Князьков А.Ф., Дедюх Р.И.

Преимуществами способов СМТ являются: относительно высокая производительность, возможность получения сварных соединений с относительно лучшими эксплуатационными свойствами, относительно низкими напряжениями и деформациями.

Основными техническими средствами реализации способов СМТ являются модуляторы-приставки и сварочные преобразователи инверторного типа. Однако независимо от конструкции технического средства данные способы не находят широкого применения. Объясняется это следующими недостатками:

- способы СМТ реализуются по жестким программам, которые не позволяют изменять (адаптировать) параметры модуляции при возникновении возмущений со стороны объектов: дуга, сварочная ванна;
- наличие пульсаций светового излучения, возникающие из-за разницы в интенсивности излучения дуги во время импульсов и пауз, что при продолжительной работе создает зрительные и психологические нагрузки;

Иначе данные способы и устройства реализуют концепцию «Машина - технология».

Для возможности широкого использования процесса СМТ электродами с покрытием разработан способ (Пат.РФ 2268809), позволяющий в значительной степени компенсировать приведенные выше недостатки. При этом появилась возможность активного управления тепловложением за счет обратных связей по

состоянию объекта (дуги), то есть сварщик, незначительно изменяя длину дуги, воздействуя тем самым на ее напряжение, изменяет параметры модуляции в соответствие с собственными физическими возможностями при формировании сварных швов. Иначе данный способ СМТ классифицирован как способ реализующий концепцию «Машина - человек - технология». Однако при сварке корневых швов и изделий малой толщины имеются существенные недостатки:

- образование прожогов во время протекания основного импульса;
- разбрызгивание расплавленного металла.

Поэтому совершенствование процесса СМТ в рамках концепции «Машина - человек - технология», обеспечивающего формирование качественных корневых швов в разных пространственных положениях, а также разработка технических средств реализации на базе преобразователя с промежуточным звеном повышенной частоты, имеют актуальное значение.

Цель работы

Разработка технических средств реализации процесса сварки модулированным током на базе преобразователя с промежуточным звеном повышенной частоты, а также алгоритмов модуляции для корневых швов и изделий малой толщины.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- разработать способы сварки модулированным током для корневых швов и изделий малой толщины;
- разработать метод определения скорости плавления покрытых электродов при сварке модулированным током;
- разработать схемное решение силовой части сварочного преобразователя для реализации процесса сварки модулированным током и исследовать электромагнитные процессы, протекающие в ней при его работе в режимах холостого хода и нагрузки;
- разработать обоснованные рекомендации по предварительному выбору параметров модуляции для сварки корневых швов и изделий малой толщины.

Объектом настоящей диссертационной работы является преобразователь инверторного типа; **предметом** – способы сварки модулированным током электродами с покрытием.

Методы исследований

Теоретические методы исследований проведены с применением дифференциального, интегрального и операционного исчислений, а также с помощью дискретного преобразования Лапласа. Проверка промежуточных и

окончательных аналитических выражений осуществлялась с помощью программы Mahtcad; в работе задействованы эмпирические методы, синхронизированные с осциллографированием (осциллографы С1-74 и С8-13) и регистрацией электрических сигналов мобильным регистратором технологических процессов MPC – 02м.

Вклад автора

Вклад автора заключается в разработке экспериментальной установки сварочного преобразователя инверторного типа, его принципиальных электрических схем, а также новых способов СМТ для корневых швов и изделий малой толщины. Автором проведен анализ принципа работ известных принципиальных электрических схем сварочных преобразователей инверторного типа и существующих способов СМТ. Исследовано формирование швов при сварке в разных пространственных положениях пластин толщиной 3 мм (сталь 20) и установлены параметры модуляции, обеспечивающие лучшие сварочно-технологические свойства покрытых электродов УОНИ-13/55 диаметром 3 мм. Проведены исследования электромагнитных процессов, протекающих в силовой части преобразователя и сварочном контуре, а также экспериментальная проверка разработанного преобразователя на нагрузку. В соответствии с предложенной Мазелем А.Г. методикой по определению эффективных приэлектродных напряжений разработан метод определения скорости плавления покрытых электродов при сварке модулированным током.

Изложенные в работе теоретические результаты и выводы подтверждаются экспериментальными исследованиями, полученными методом осциллографирования разработанных способов СМТ, электромагнитных процессов, протекающих в силовой части преобразователя, а также экспериментальной проверки скоростей плавления покрытых электродов при СМТ и механических испытаний сварных соединений.

Научная новизна

1. Экспериментально установлено, что для получения качественных корневых швов и швов изделий малой толщины, относительно низкого разбрызгивания, а также обеспечения высокого силового воздействия дуги и минимального объема расплавленного основного металла, необходимо:

- длительность дополнительных импульсов устанавливать в зависимости от диаметра электрода и его конкретной марки в диапазоне от 2 до 7 мс, а длительность основных импульсов ограничивать до величины, обеспечивающей образование «замочной скважины» (пат. РФ 2322331);

- основные импульсы формировать в виде серий дополнительных, длительность которых устанавливают равной длительности дополнительных импульсов, протекающих в интервале тока паузы (пат. РФ 2371288);

- во время протекания дополнительного импульса, после задержки 0,5...3 мс от начала его протекания, амплитудное значение тока дополнительного импульса снижать до тока паузы, при этом длительность паузы в интервале протекания дополнительного импульса не превышает 1 мс (подана заявка на изобретение 2009149145 от 28.12.2009).

2. Установлен механизм повышения производительности плавления покрытых электродов при сварке модулированным током и разработан метод, позволяющий более точно оценивать мощность, идущую на их плавление. Теоретически обоснованно и экспериментально подтверждено, что в процессе сварки модулированным током мощность, идущая на плавление покрытых электродов, имеет относительно большее значение по сравнению с мощностью при РДС, что при одинаковом среднем значении сварочного тока объясняет повышение производительность процесса на (20...30) %.

3. Установлено, что для ограничения роста и раскачки напряжения на элементах силовой части преобразователя, а также обеспечения его надежной работы в режиме нагрузки необходимо:

- параллельно тиристорам, катоды которых соединены вместе, подключить цепи, состоящие из последовательно соединенных тиристора и дросселя (пат. РФ 2306213);

- в первичном контуре выходного понижающего трансформатора первичную обмотку включить по одноконтурной схеме; при этом один конец первичной обмотки подключить к общей точке соединения анодов тиристорных параллельных ветвей, а другой - к плюсу источника питания (пат. РФ 2339491).

4. Экспериментально установлены обоснованные рекомендации по выбору длительности дополнительных импульсов, а также частоты их следования в интервале протекания основной паузы, обеспечивающие лучшие сварочно-технологические свойства покрытых электродов УОНИ -13/55 диаметром 3 мм. Показано, что для данной марки и диаметра электродов величина длительности дополнительных импульсов находится в диапазоне от 5 до 7 мс, а частота их следования – в интервале от 50 до 60 Гц.

Реализация результатов работы

Результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы при создании сварочного преобразователя инверторного типа, предназначенного

для РДС и СМТ. Материалы об использовании результатов работы имеются в приложении к диссертации.

Практическая значимость результатов исследований

1. Разработаны, запатентованы и внедрены в производство способы сварки модулированным током, обеспечивающие качественное формирование корневых швов и швов изделий малой толщины в разных пространственных положениях.
2. Разработан метод определения скорости плавления покрытых электродов при сварке модулированным током.
3. Разработан и изготовлен опытный образец тиристорного преобразователя, позволяющий реализовать адаптацию параметров модуляции в процессе сварки.
4. Предложены рекомендации по выбору длительности дополнительных импульсов и частоты их следования в интервале протекания основной паузы.

Положения, выносимые на защиту

1. Способы сварки модулированным током для корневых швов и изделий малой толщины.
2. Метод определения скорости плавления покрытых электродов при сварке модулированным током.
3. Силовая часть тиристорного преобразователя инверторного типа с широтно-импульсным алгоритмом управления.
4. Рекомендации по выбору длительности дополнительных импульсов и частоты их следования в интервале протекания основной паузы.

Публикации

Материалы работы опубликованы в девяти работах, в том числе две в рецензируемом научном журнале из списка рекомендованных ВАК РФ. По результатам работы получено четыре патента на изобретения.

Апробация работы

Результаты работы представлены на XIII международной, научно-практической конференции «Современная техника и технологии» в марте 2007 г в г. Томске; университетской научно-практической конференции посвященной 100-летию со дня рождения Никитина Н.В. в декабре 2007 г в г. Томске; XIV международной, научно-практической конференции «Современная техника и технологии» в марте 2008 г в г. Томске; на научных семинарах кафедр «Оборудования и технологии сварочного производства», «Транспорта и хранения нефти и газа» в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, а также кафедры «Технология машиностроения» в Кузбасском государственном техническом университете в г. Кемерово.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа выполнена на 146 страницах машинописного текста, содержит 76 рисунков, 16 таблиц, 7 страниц приложения. Общий объем – 171 страница.

Основные обозначения и сокращения

РДС – ручная дуговая сварка электродами с покрытием;

СМТ – сварка модулированным током электродами с покрытием;

$I_u, I_p, I_{\Delta.u}$ – амплитудные значения тока основных импульсов, паузы, дополнительных импульсов [А];

$I_{cp.}$ – среднее значение сварочного тока за цикл модуляции, [А];

I_n – номинальное значение сварочного тока, [А];

$I_{cp.\delta}$ – среднее действующее значение сварочного тока при РДС;

$t_{осн.у}, t_{осн.п}, t_{\Delta.у}, t_{\Delta.п}, t'_{\Delta.п}$ – длительности основных импульсов сварочного тока, основной паузы, дополнительных импульсов, пауз между дополнительными импульсами, пауз между дополнительными импульсами протекающих в серии, [мс];

$t_{сн}$ – продолжительность ограничения тока короткого замыкания в интервале протекания дополнительного импульса; [мс];

$f_{\Delta.у}$ – частота следования дополнительных импульсов сварочного тока, [Гц];

$T_{осн.у}, T_{осн.у(серия)}, T_{\Delta.у}, T'_{\Delta.у}$ – периоды следования основных импульсов сварочного тока, серий дополнительных импульсов, дополнительных импульсов, дополнительных импульсов в серии, [мс];

$I_{кз.\Delta.у}, I_{кз.п}, I_{кз.у}$ – амплитудные значения сварочного тока при коротком замыкании капли и сварочной ванны во время протекания дополнительных импульсов в интервале паузы, во время протекания основной паузы, во время протекания основного импульса, [А];

$U_{\Delta.ср.}$ – среднее значение напряжения дуги, [В];

U_3 – заданное значение напряжения, [В];

l_{δ} – длина дуги, [мм];

$U_{к+а}$ – сумма приэлектродных падений напряжения, [В];

$U^{\vartheta}_{к.п}$ – эффективное катодное падение напряжения на прямой полярности, [В];

$U^{\vartheta}_{к.о}$ – эффективное катодное падение напряжения на обратной полярности, [В];

U^{ϑ}_a – эффективное анодное падение напряжения, [В].

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы и сформулированы цель работы, ее новизна и практическая значимость, представлены методы исследований и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Анализ технических средств реализации процесса сварки модулированным током» проанализирован принцип работы силовых частей сварочных преобразователей инверторного типа, рассмотрены известные способы СМТ электродами с покрытием. Показано, что в динамично развивающихся сварочных преобразователях инверторного типа процесс СМТ реализуется по жестким программам. Отмечены недостатки данной схемы реализации процесса и показана актуальность разработки преобразователя инверторного типа, реализующего процесс СМТ с адаптацией параметров модуляции. В результате сформулированы цель работы и задачи исследований.

Во второй главе «Разработка способов сварки модулированным током для корневых швов и изделий малой толщины» проведены экспериментальные исследования процесса формирования шва при сквозном проплавлении пластин толщиной 3 мм на рекомендованных параметрах модуляции способа по пат. РФ2268809. Сущность эксперимента: сваривались две пластины размером 150x70x3 мм, материалом которых являлась сталь 20. Сборка пластин производилась с зазором равным в 1,5 мм; 2 мм; 3 мм. Для сварки использовались электроды марки УОНИ-13/55 диаметром 3 мм. Параметры модуляции устанавливались из диапазонов: $I_u = I_{\partial.u} \approx (150 \dots 180)$ А; $t_{осн.u} \approx (80 \dots 200)$ мс; $t_{осн.п} \approx (200 \dots 400)$ мс; $t_{\partial.u} \approx (0,5 \dots 2)$ мс; $f_{\partial.u} \approx (120 \dots 50)$ Гц; $I_p \approx 30$ А. Осциллограмма способа СМТ представлена на рисунке 1.

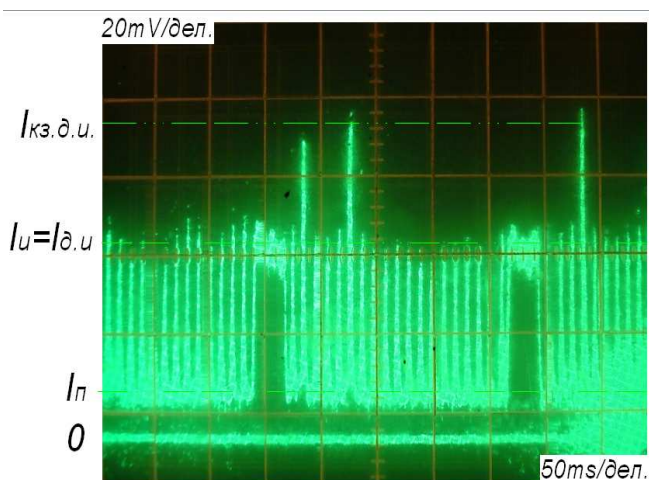


Рисунок 1 – Осциллограмма способа сварки модулированным током электродами с покрытием.

Показано, что для сохранения лучших сварочно-технологических свойств покрытых электродов и устранения образования прожогов длительность основного импульса ($t_{осн.u}$) необходимо ограничить до величины, обеспечивающей в каждом

конкретном случае образование «замочной скважины». При этом длительность дополнительных импульсов ($t_{\partial.u}$), с целью равномерного плавления электрода без образования «козырька», устанавливать в зависимости от диаметра электрода и его марки из диапазона (0,5...7) мс (Пат.РФ 2322331). При исследовании ряда осциллограмм с подобными параметрами модуляции по длительности ($t_{осн.у} \approx (20...80)$ мс; $t_{осн.п} \approx (100...600)$ мс; $t_{\partial.у} \approx (0,5...7)$ мс) установлено, что перенос электродного металла с помощью коротких замыканий наиболее типичен для интервалов протекания основной паузы.

Экспериментально установлено, что для обеспечения лучших сварочно-технологических свойств покрытых электродов длительность основного импульса необходимо формировать в виде серии дополнительных, а во время протекания дополнительного импульса, после задержки (0,5...3) мс от начала его протекания, необходимо снижение амплитудного значения тока импульса до тока паузы. В результате сформулированы требования к способам СМТ и разработаны способы, циклограммы которых представлены на рисунках 2 и 3. Осциллограммы тока способа СМТ для корневых швов и изделий малой толщины с формированием основных импульсов в виде серий дополнительных представлены на рисунке 4. Сварочный ток регистрировался с шунта (200А, 75 мВ, класс точности: 0,5) со специально настроенными измерительными проводами.

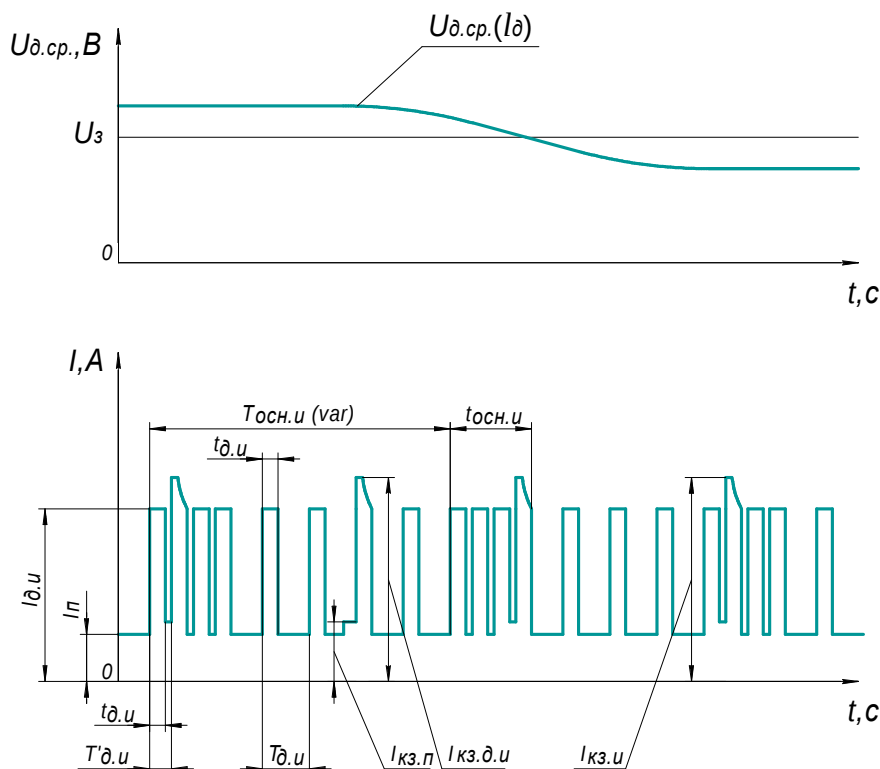


Рисунок 2 – Циклограмма способа сварки модулированным током для корневых швов и изделий малой толщины с формированием основного импульса в виде серии дополнительных импульсов.

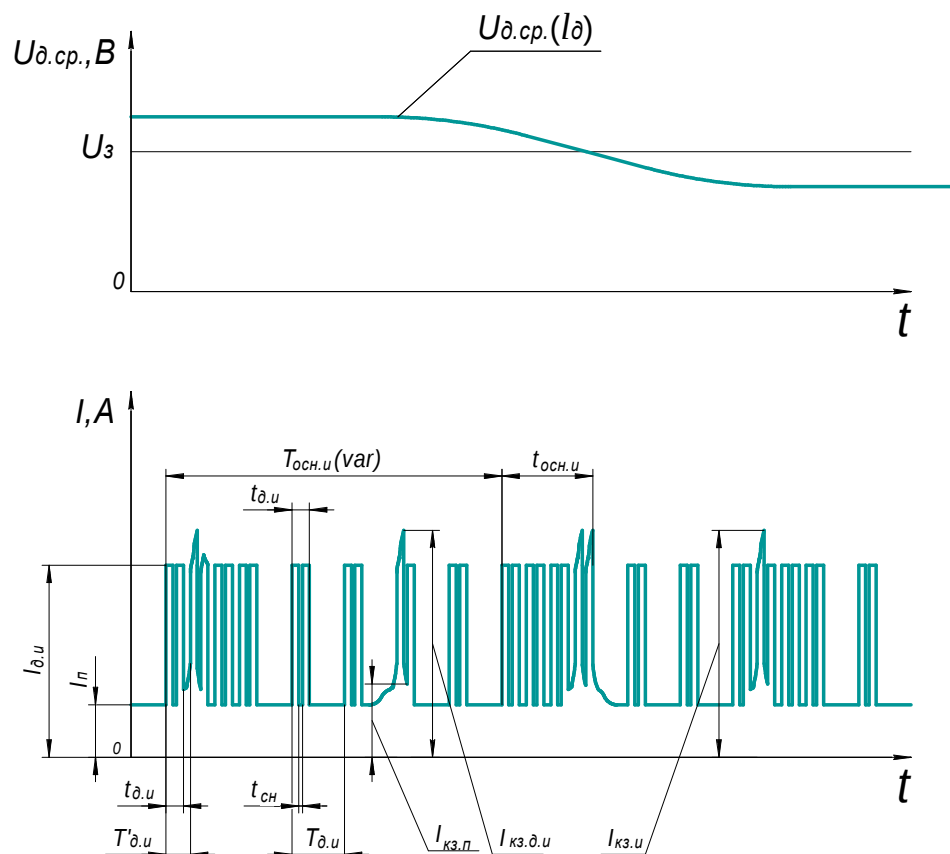


Рисунок 3 – Циклограмма способа сварки модулированным током для корневых швов и изделий малой толщины с формированием основного импульса в виде серии дополнительных и снижением амплитудного значения тока дополнительного импульса до тока паузы.

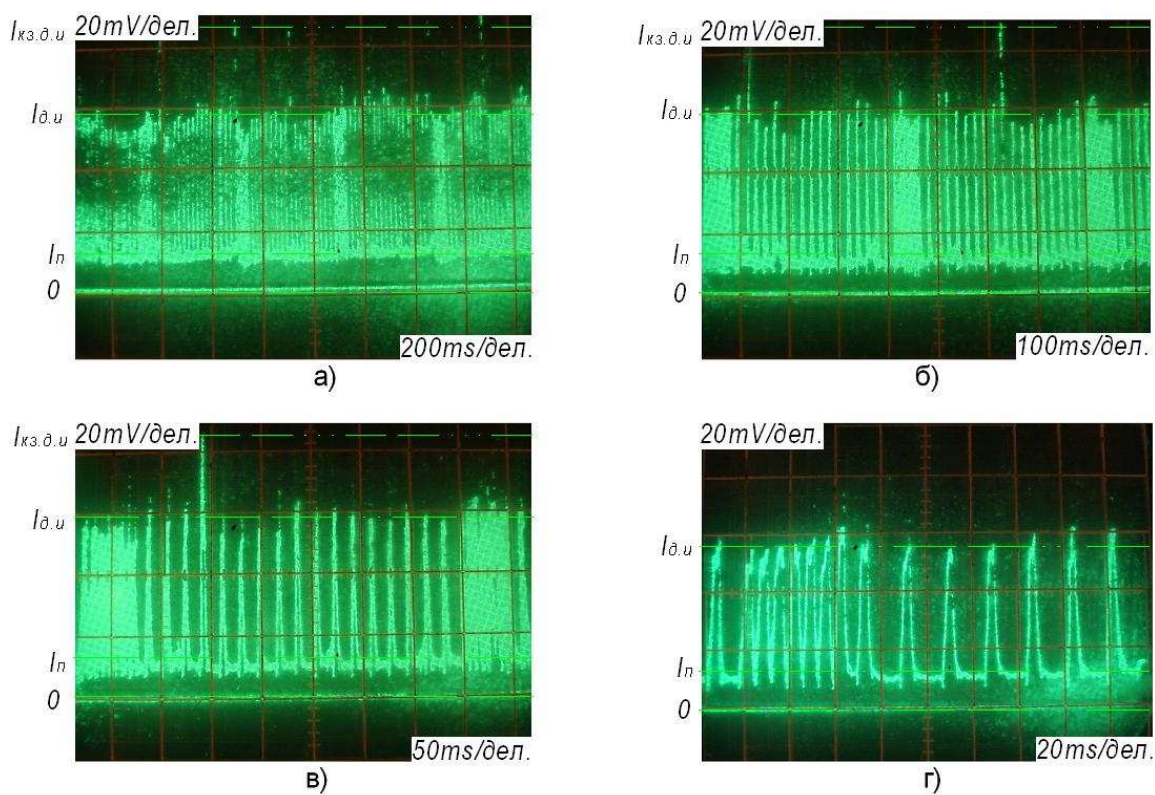


Рисунок 4 - Осциллограммы способа сварки модулированным током с формированием основных импульсов в виде серии дополнительных (Пат.РФ 2371288); электроды УОНИ -13/55 диаметром 3 мм; $I_{д.у} = 170$ А; $I_n \approx 30$ А; $t_{осн.у} \approx 55$ мс; $t_{осн.п} \approx 325$ мс; $t_{д.у} \approx 6$ мс; $T_{осн.у(серия)} \approx 380$ мс; $T_{д.п} \approx 20$ мс.

Третья глава «Определение скорости плавления покрытых электродов при сварке модулированным током» посвящена сравнительной оценке производительности РДС и СМТ.

Произведены эксперименты по плавлению покрытых электродов УОНИ-13/55 диаметром 3 мм. Показано, что диапазон номинального значения сварочного тока, при котором проявляются лучшие сварочно-технологические свойства электродов УОНИ-13/55 диаметром 3 мм, находится в пределах от 170 до 180 А (Рисунок 5).

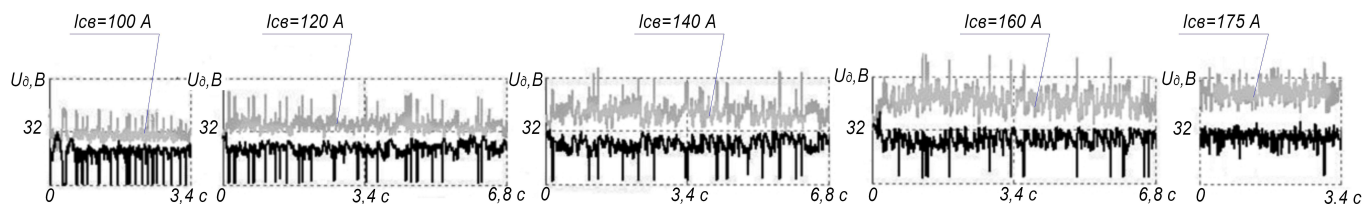


Рисунок 5 - Осциллограммы токов и напряжений, зарегистрированные при разных средних действующих значениях тока РДС электродами УОНИ-13/55 диаметром 3 мм.

При СМТ разработанными способами основное плавление покрытых электродов происходит в интервалах протекания основных и дополнительных импульсов, поэтому для оценки мощности, действующей в приэлектродной области, принято допущение:

«эффективное анодное падение напряжения во время протекания основных и дополнительных импульсов, равно эффективному анодному падению напряжения, действующему в приэлектродной области при РДС, при токах равных амплитудному значению тока основных и дополнительных импульсов».

Физический смысл данного допущения заключается в следующем. С помощью РДС при различных средних действующих значениях тока осуществляется экспериментальная оценка скоростей плавления покрытых электродов и средних значений $U_{к+а}$. Согласно предложенным Мазелем А.Г. формулам определяются $U_{к.п}^3$, $U_{к.о.}^3$, U_a^3 для каждого режима сварки. В дальнейшем предполагается, что амплитудное значение тока основных и дополнительных импульсов равно среднему действующему значению тока РДС при котором определены $U_{к.п}^3$, $U_{к.о.}^3$, U_a^3 и производится оценка средней мощности, идущей на плавление покрытого электрода за цикл модуляции.

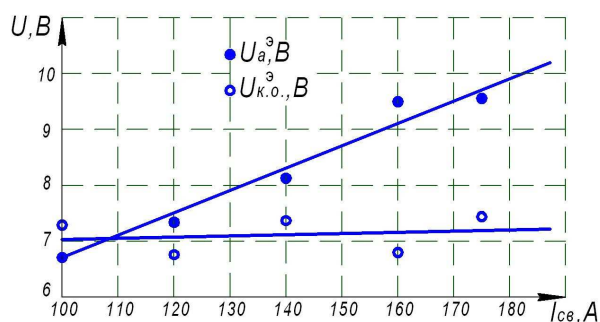


Рисунок 6 - Графики зависимостей U_a^3 , $U_{к.о.}^3$ от различных $I_{ср.о}$ при сварке на обратной полярности.

Экспериментальные средние значения $U_{к+а}$ представлены в таблице 1. Экспериментальные значения скоростей плавления покрытых электродов на прямой и обратной полярностях, а также расчетные значения $U_{к.п}^э$, $U_{к.о}^э$, $U_a^э$ представлены в таблице 2. Графики зависимостей $U_a^э$, $U_{к.о}^э$ от различных $I_{ср.д}$ при РДС на обратной полярности – на рисунке 6.

Таблица 1 – Средние значения $U_{к+а}$ при различных режимах наплавки

Значение сварочного тока, А		$U_{(к+а)н.ср.}^э$	$U_{(к+а)о.ср.}^э$
Прямая полярность	Обратная полярность	В	В
110	100	12,7	14
125	120	14,08	14,1
150	140	16,1	15,5
165	160	19	16,3
180	175	20,75	17

Таблица 2 – Экспериментальные значения скоростей плавления покрытых электродов и результаты расчетов $U_{к.п}^э$, $U_{к.о}^э$, $U_a^э$

Экспериментальная скорость плавления электрода, см/с		$U_a^э$	$U_{к.п}^э$	$U_{к.о}^э$
V_n	V_o	В	В	В
0,3365	0,3725	6,71	6	7,29
0,4239	0,4578	7,34	6,74	6,76
0,54	0,55	8,13	7,97	7,37
0,6962	0,6903	9,5	9,5	6,8
0,8	0,7	9,56	11,2	7,44

Оценка производительности плавления покрытых электродов осуществлялась для параметров модуляции представленных в таблице 3 и РДС с учетом равенства средних значений токов 100 А.

Таблица 3 – Параметры модуляции способа сварки модулированным током

$I_{ср.}$	I_u	I_n	$I_{д.у.}$	$t_{осн.у.}$	$t_{осн.п.}$	$t_{д.у.}$	$f_{д.у.}$
А	А	А	А	мс	мс	мс	Гц
102	150	30	150	200	200	2	100
100	180	30	180	200	400	2	100

Оценку среднего значения мощности, идущей на плавление покрытого электрода за цикл модуляции способов по Пат. РФ2268809 и Пат. РФ2322331, производили по формуле:

$$P_{ц.ср.} = \frac{I_u \cdot U_{a1}^э \cdot (t_{осн.у.} + t_{д.у.} \cdot n) + I_n \cdot U_{a2}^э \cdot t_{д.п.} \cdot m}{(t_{осн.у.} + t_{осн.п.})}, \quad (1)$$

где $U_{a1}^э$, $U_{a2}^э$ – эффективные анодные падения напряжения соответствующие току основных и дополнительных импульсов и току паузы; n – количество налагаемых дополнительных импульсов на ток паузы; m – количество промежуточных пауз между дополнительными импульсами.

Среднее значение мощности, идущей на плавление покрытого электрода за цикл модуляции способа (Пат.РФ 2371288), в котором основной импульс тока сформирован в виде серии дополнительных импульсов имеет вид:

$$P_{ц.ср.} = \frac{I_{д.и} \cdot U_{a1}^3 \cdot t_{д.и} \cdot (n + n_1) + I_n \cdot U_{a2}^3 \cdot (t_{д.н.} \cdot m + t'_{д.н.} \cdot m_1)}{(t_{осн.и} + t_{осн.н})}, \quad (2)$$

где n_1 – количество дополнительных импульсов в серии, формирующих основной импульс сварочного тока; m_1 – количество промежуточных пауз в серии между дополнительными импульсами.

Средние значения мощностей, идущие на плавление покрытых электродов за цикл модуляции при приведенных в таблице 3 параметрах равны: $P_{ц.ср1} \approx 848,5$ Дж/с; $P_{ц.ср2} \approx 921,7$ Дж/с. При этом для РДС при среднем действующем значении сварочного тока 100 А и соответствующего для данного тока U_a^3 , мощность, идущая на плавление покрытого электрода равна: $P_{ц.ср} = U_a^3 \cdot I_{ср} = 6,71 \cdot 100 = 671$ Дж/с.

Установлено, что при СМТ мощность, идущая на плавление покрытых электродов, имеет относительно большее значение по сравнению с мощностью при РДС, что при одинаковом среднем значении сварочного тока объясняет повышение производительности на (20...30)%.

Экспериментально подтверждено, что применение методики определения эффективных приэлектродных падений напряжения позволяет более точно оценивать мощность, идущую на плавление покрытых электродов и в соответствие с тепловым балансом энергии в приэлектродной области, а также приближенным численным расчетом нагрева покрытых электродов протекающим током, определять скорость их плавления. В частности для электродов УОНИ-13/55 диаметром 3 мм, скорость плавления определяется по формуле:

$$g = \frac{0,48 \cdot P_{ц.ср.}}{c \cdot (T_k - T_{см}) + \lambda_{пл}}, \quad (3)$$

где T_k – средняя температура капель, [°K]; $T_{см}$ – средняя температура подогрева стержня протекающим током, [°K]; $\lambda_{пл}$ – средняя скрытая теплота плавления, [Дж/г]; c – средняя теплоемкость [Дж/(г·°K)].

Сопоставление расчетных и экспериментальных скоростей плавления покрытых электродов представлено в таблице 4.

Таблица 4 – Сопоставление расчетных и экспериментальных скоростей плавления покрытых электродов при сварке постоянным и модулированным током

РДС			СМТ		
эксперимент	эксперимент	расчет	эксперимент	эксперимент	расчет
$V, \text{ см/с}$	$V, \text{ а/с}$	$V, \text{ а/с}$	$V, \text{ см/с}$	$V, \text{ а/с}$	$V, \text{ а/с}$
0,46	0,21	0,18	0,59	0,265	0,28
Погрешность: $\Delta \approx 15,1 \%$			Погрешность: $\Delta \approx 5,4 \%$		

В четвертой главе «Разработка преобразователя инверторного типа для сварки модулированным током» модернизирована конструкция силовой части тиристорного преобразователя, принципиальная электрическая схема которой представлена на рисунке 7. Отличительной особенностью данной силовой части является:

- наличие цепей, состоящих из последовательно соединенных дросселя и тиристора, позволяющих ограничивать раскочку напряжения на коммутирующем конденсаторе, а также рост напряжения на других элементах схемы силовой части;
- включение первичной обмотки силового трансформатора по одноконтурной схеме, что позволяет повысить надежность работы преобразователя.

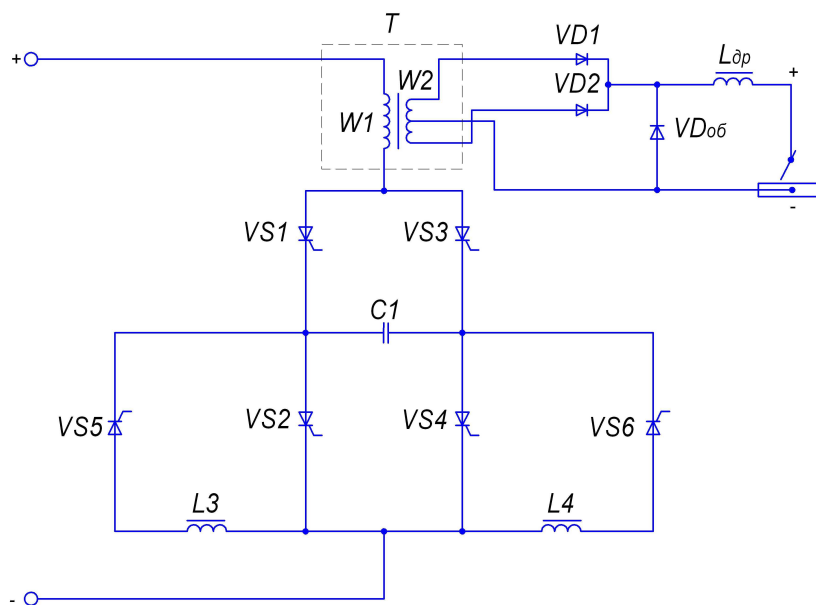


Рисунок 7 - Принципиальная электрическая схема силовой части преобразователя для сварки модулированным током (Пат.РФ2306213; Пат.РФ2339491).

Для определения номинальных параметров элементной базы силовой части, а также учета характера протекающих процессов в системе «источник питания – сварочная дуга» проведены исследования электромагнитных процессов. Исследования осуществлялись с помощью метода сопряжения этапов, внутри которых переходные процессы в рассматриваемых цепях описывали системой линейных дифференциальных уравнений. Для каждого этапа составлялась расчетная схема замещения с соответствующими начальными условиями и допущениями. Далее, при помощи операторного преобразования Лапласа определялись основные выражения для токов и напряжений, которые являлись начальными условиями для каждого последующего этапа, и конечными – для предыдущего. Окончательные аналитические выражения токов и напряжений для каждого режима работы преобразователя имеют вид:

- режима холостого хода:

$$i_1(t_{3\vartheta}) = \sqrt{i_1^2(0) + \frac{[U + U_c(0)]^2}{L_1^2 \cdot \omega^2}} \cdot \cos\left(\omega \cdot t_{3\vartheta} + \arctg\left[\frac{i_1(0) \cdot L_1 \cdot \omega}{U + U_c(0)}\right]\right); \quad (4)$$

$$U_c = \frac{i_1(0)}{C \cdot \omega} \cdot \sin(\omega \cdot t_{3\vartheta}) - [U + U_c(0)] \cdot \cos(\omega \cdot t_{3\vartheta}) + U_c(0) =$$

$$\frac{i_1(t_{2\vartheta})}{C \cdot \omega} \cdot \sin(\omega \cdot t_{3\vartheta}) - [U + U_c(t_{2\vartheta})] \cdot \cos(\omega \cdot t_{3\vartheta}) + U_c(t_{2\vartheta}); \quad (5)$$

- режима нагрузки:

$$i_1(t) = i_1(0) \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{1}{\omega \cdot L_\Sigma} \cdot (U - U_c(0)) \cdot \sin(\omega \cdot t); \quad (6)$$

$$i_2(t) = \frac{U'_\partial}{R'_{\partial p}} + \frac{U'_\partial + i_1(0) \cdot R'_{\partial p}}{R'_{\partial p}} \cdot \exp\left(-\frac{R'_{\partial p}}{L'_{\partial p}} \cdot t\right) - i_1(0) \cdot \cos(\omega \cdot t) -$$

$$- C \cdot (U - U_c(0)) \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (7)$$

$$U_c = \frac{i_1(0)}{C \cdot \omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) - (U - U_c(0)) \cdot \cos(\omega \cdot t) + U_c(0). \quad (8)$$

Осциллограммы напряжений на элементах силовой части преобразователя при работе в режимах холостого хода и нагрузки представлены на рисунках 8 и 9.

С учетом приведения параметров вторичного контура силовой части к первичному, а также применением метода дискретного преобразования Лапласа рассчитаны статические характеристики преобразователя и установлены желаемые внешние вольт – амперные характеристики, представленные на рисунке 10. Расчетные значения точек статических характеристик преобразователя получены при $L_{\partial p} = 5$ мкГн, $R_{\partial p} = 0,1$ Ом и частоте преобразования 20 кГц.

В пятой главе «Разработка оборудования и рекомендаций по сварке» приведены рекомендации по выбору параметров модуляции разработанных способов сварки для корневых швов и изделий малой толщины. В соответствие с программой оценки сварочно-технологических свойств покрытых электродов (ГОСТ9466-75) предложено устанавливать длительность дополнительного импульса и частоту следования дополнительных импульсов в интервале протекания основной паузы в зависимости от оценки «стабильности горения дуги» и «сплошности сварных швов» при их формировании в разных пространственных положениях.

Разработаны принципиальные электрические схемы блоков, входящих в конструкцию сварочного преобразователя (схема управления силовой частью преобразователя, схема управления сварочным циклом для способа в котором основной импульс сварочного тока сформирован в виде серии дополнительных импульсов).

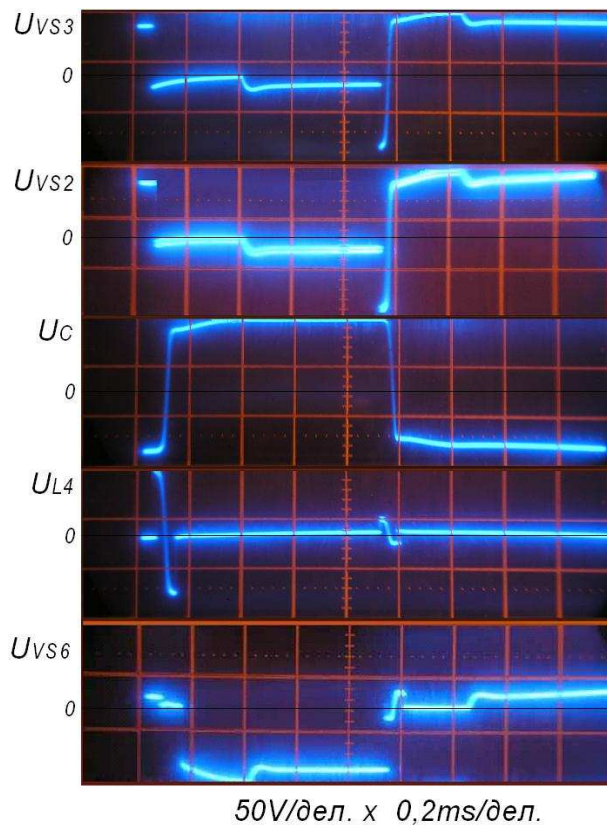


Рисунок 8 - Осциллограммы напряжений на элементах силовой части преобразователя за один полупериод работы в режиме холостого хода.

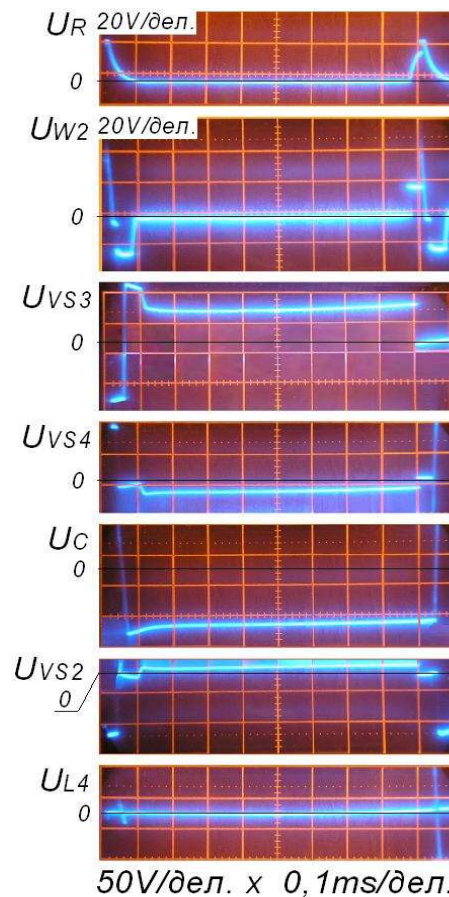


Рисунок 9 - Осциллограммы напряжений на элементах силовой части преобразователя за один полупериод работы в режиме нагрузки.

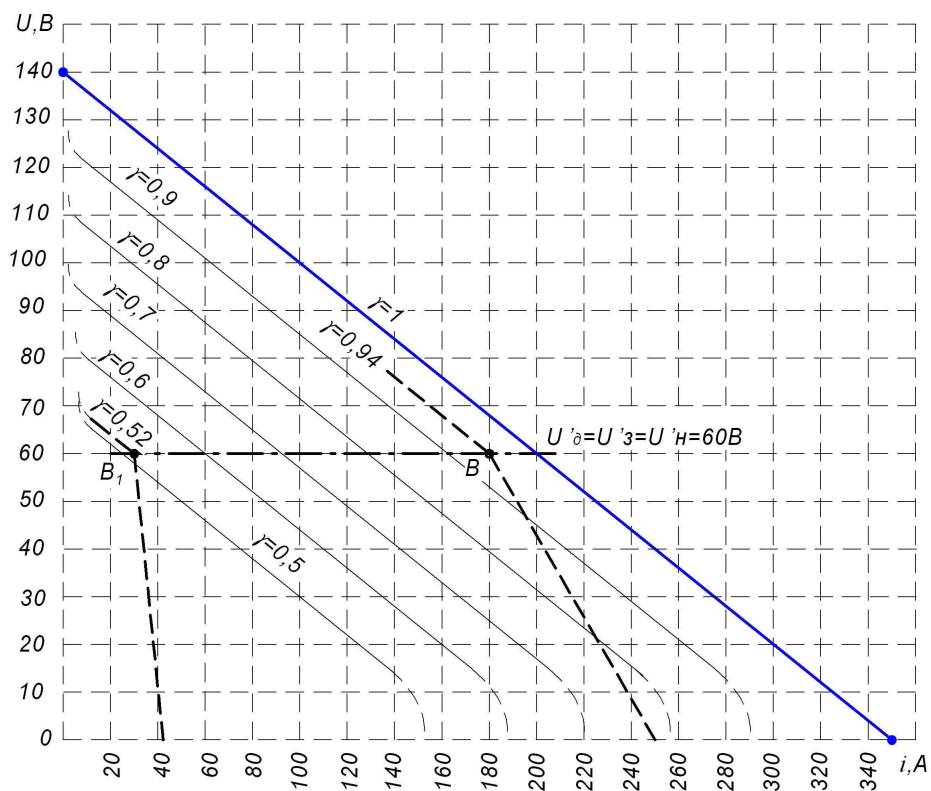


Рисунок 10 – Статические характеристики преобразователя.

ОБЩИЕ ВЫВООДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа существующих данных о механизме движения расплавленного металла в объеме сварочной ванны, а также полученных экспериментальных данных:

- установлено, что при сварке модулированным током, для получения корневых швов без образования прожогов необходимо ограничить длительность основного импульса до величины, обеспечивающей в каждом конкретном случае образование «замочной скважины» (Пат. РФ 2322331);

- установлено, что при сварке модулированным током, для обеспечения физической устойчивости горения дуги, технологической устойчивости процесса, поддержания существования «замочной скважины» в интервале протекания основной паузы, а также равномерного плавления покрытых электродов необходимо расширить ранее известный диапазон длительности дополнительных импульсов (0,5...2) мс до 7 мс (Пат. РФ 2371288);

- показано, что для обеспечения лучших сварочно-технологических свойств покрытых электродов длительность основного импульса необходимо формировать в виде серии дополнительных, а во время протекания дополнительного импульса, после задержки (0,5...3) мс от начала его протекания - снижать амплитудное значение тока импульса до тока паузы. Продолжительность снижения (ограничения тока короткого замыкания) в интервале протекания дополнительного импульса не превышает 1 мс;

- разработаны способы сварки модулированным током для корневых швов и изделий малой толщины.

2. Разработан метод определения скорости плавления покрытых электродов при сварке модулированным током, позволяющий более точно оценивать мощность, идущую на их плавление. Теоретически обоснованно и экспериментально подтверждено, что в процессе сварки модулированным током на обратной полярности, мощность, идущая на плавление покрытых электродов:

- зависит от параметров импульсов и определяется произведением амплитудного значений тока основных, дополнительных импульсов, а также тока паузы на соответствующие им эффективные анодные падения напряжения;

- растет значительно интенсивнее, чем мощность, идущая на плавление изделия;

- имеет относительно большее значение по сравнению с мощностью при РДС, что при одинаковом среднем значении сварочного тока объясняет повышение производительности на (20...30) %.

3. Разработана схема силовой части тиристорного преобразователя, отличающаяся наличием ограничивающих рост напряжения цепей и включением первичной обмотки силового трансформатора по однофазной схеме, что позволяет ограничить раскату напряжения на коммутирующем конденсаторе и повысить надежность работы преобразователя (Пат. РФ2306213; Пат. РФ2339491). При этом проведены исследования электромагнитных процессов, в результате которых получены аналитические выражения, позволяющие установить рациональную область параметров элементной базы преобразователя.

4. Экспериментально установлены рекомендации по выбору параметров модуляции разработанных способов сварки. Показано, что при сварке в разных пространственных положениях электродами УОНИ-13/55 диаметром 3 мм, при величине зазора между кромками свариваемых пластин от 1,5 до 3 мм:

- величина длительности основного импульса составляет: (20...30) мс;
- величина длительности серии дополнительных импульсов: (20...80) мс;
- частота следования дополнительных импульсов в интервале протекания основной паузы: (50...60) Гц;
- диапазон изменения длительности основной паузы: (140...400) мс;
- диапазон изменения длительности дополнительного импульса: (5...7) мс;
- уровень механических свойств сварных соединений находится на уровне механических свойств основного металла.

5. Разработанный сварочный преобразователь, а также способы сварки модулированным током внедрены на ЗАО «Сибирская компания». При этом экономия затрат на 1 кг наплавленного металла составила 196,3 руб. в ценах на май – июнь 2010 г, что позволило получить дисконтированный чистый денежный доход за первый год, при ставке дисконтирования $i' = 10\%$, равным $NPV_{(1)} = 172637,4$ руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Князьков А.Ф., Князьков С.А., Деменцев К.И. Инверторный источник питания для сварки модулированным током // Сварочное производство. – 2008. - №5. - С. 18-22.

2. Князьков А.Ф., Деменцев К.И., Князьков В.Л. Определение скорости плавления покрытых электродов при ручной дуговой сварке модулированным током // Сварочное производство. – 2009. - №5. - С. 3-7.

3. Пат. РФ2306213, МКИ В 23 К 9/09. Инверторный источник питания для электродуговой сварки/ А. Ф. Князьков, С.А. Князьков, К.И. Деменцев - Заявл. 17.04.2006 г.

4. Пат. РФ2322331 МПК В23К 9/173 В23К 9/09. Способ ручной электродуговой сварки плавящимся электродом модулированным током корневого шва/ Князьков А.Ф., Князьков С.А., Деменцев К.И., Князьков В.Л., Качаев Д.В. - Заявл. 26.06.2006 г.

5. Пат. РФ2339491, МПК В 23 К 9/09. Инверторный источник питания для электродуговой сварки/ А. Ф. Князьков, С.А. Князьков, К.И. Деменцев - Заявл. 09.01.2007 г.

6. Пат. РФ 2371288 МПК В23 9/173 В23К9/09. Способ ручной электродуговой сварки плавящимся электродом модулированным током корневого шва / А.Ф. Князьков, К.И. Деменцев, С.А. Князьков, В.Л. Князьков. – Заявл. 07.07.2008 г.

7. Князьков А.Ф., Деменцев К.И., Маюнов С.А. Инверторный источник питания для сварки модулированным током. XIII Международная научно-практическая конференция «Современная техника и технология СТТ 2007» / Сборник трудов в 3-х томах. Т1.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007 - С. 290-295.

8. Деменцев К.И., Князьков С.А., Калошин А.А. Влияние подогрева стержня покрытого электрода на скорость его плавления при сварке модулированным током. XIV Международная научно-практическая конференция «Современная техника и технология СТТ 2008» / Сборник трудов в 3-х томах. Т1.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008 - С. 269-271.

9. Деменцев К.И., Князьков А.Ф., Князьков В.Л. Управление формированием корневого слоя шва неповоротных стыков трубопроводов. Научно-практическая конференция посвященная 100-летию со дня рождения Никитина Н.В. .- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007 - С. 26-28.