

На правах рукописи

КИСЕЛЕВ Алексей Сергеевич

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО
ПРЯМОУГОЛЬНОГО ТОКА ПРИ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
МАЛЫХ ТОЛЩИН НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ**

Специальность 05.03.06 – «Технология и машины сварочного
производства»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 1998

Работа выполнена на кафедрах «Оборудование и технология сварочного производства» Томского политехнического университета и «Сварка в строительстве» Воронежской государственной архитектурно-строительной академии

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
А.М. Болдырев

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
В.А. Биржев
кандидат технических наук
В.И.Хижняков

Ведущая организация: Научно-производственный
центр «Полюс», г.Томск

Защита состоится 29 декабря 1998 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета К 003.61.01 при Институте физики прочности и материаловедения СО РАН по адресу: 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/1

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Широкое применение алюминиевых сплавов в различных отраслях промышленности обусловлено комплексом свойств, обеспечивающих им важные преимущества перед другими конструкционными материалами. При изготовлении неразъемных соединений из алюминиевых сплавов предпочтение отдается аргонодуговой сварке неплавящимся электродом переменным током, как наиболее отвечающей специфическим металлургическим и технологическим требованиям.

Однако при сварке тонкостенных деталей возникают проблемы, связанные с низкой физической и пространственной устойчивостью малоамперной дуги. В частности, нарушается стабильность теплового потока, увеличивается деформация свариваемых кромок и, соответственно, снижается качество и производительность процесса сварки,

Для решения этих проблем наиболее перспективным является использование переменного прямоугольного тока. При такой форме тока, в отличие от синусоидальной, обеспечивается возможность независимого программирования амплитудно-временных параметров режима горения дуги прямой и обратной полярности, что позволяет управлять геометрическими размерами шва, эффективностью катодного распыления поверхностной оксидной пленки и динамическим воздействием на расплав сварочной ванны. Однако механизм этого воздействия изучен пока недостаточно полно, а результаты экспериментальных исследований в ряде случаев противоречивы и не позволяют сформулировать конкретных требований к параметрам источника питания.

В связи с этим изыскание возможностей по управлению технологическими свойствами дуги переменного прямоугольного тока является необходимым условием для решения проблемы повышения качества и производительности аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов малых толщин.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма модуляции переменного прямоугольного тока и технических средств реализации, обеспечивающих повышение эффективности аргонодуговой сварки изделий из алюминиевых сплавов малых толщин неплавящимся электродом. В соответствии с поставленной целью были сформулированы конкретные задачи:

1. Разработать схему полупроводникового преобразователя постоянного

тока в переменный прямоугольный и исследовать коммутационные электромагнитные процессы при смене полярности тока в сварочной цепи.

2. Исследовать особенности начального и повторного возбуждения дуги. Определить причины нарушения устойчивости горения дуги.

3. Исследовать влияние модуляции переменного прямоугольного тока на пространственную устойчивость дуги и её силовые характеристики.

4. Исследовать влияние варьируемых параметров переменного прямоугольного тока на свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов.

5. Разработать оборудование, технологические рекомендации по сварке и осуществить внедрение их в производство.

Научная новизна работы. Впервые определены причины нарушения физической и пространственной устойчивости дуги переменного прямоугольного тока. Установлено, что физическая устойчивость определяется условиями повторного возбуждения дуги обратной полярности, а при токе менее 10А - условиями горения дуги прямой полярности. Показано, что пространственное положение дуги стабилизируется при кратковременном ограничении тока в сварочной цепи перед сменой полярности с обратной на прямую и в начальный период горения дуги прямой полярности. Установлено влияние параметров мостового тиристорного преобразователя на электромагнитные коммутационные процессы при смене полярности тока в сварочной цепи. Показано, что начальное возбуждение малоамперной дуги следует осуществлять при обратной полярности питающего напряжения. Установлена взаимосвязь между параметрами режима горения дуги обратной полярности, надежностью повторного возбуждения дуги прямой полярности в начале процесса сварки и стойкостью вольфрамового электрода. Показано, что разработанный алгоритм модуляции тока повышает эффективность процесса сварки алюминиевых сплавов малых толщин.

Практическая ценность и внедрение результатов работы. На основании проведенных исследований сформулированы требования к способам и средствам управления процессом аргонодуговой сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов малых толщин, при выполнении которых обеспечивается повышение скорости сварки и качества сварных соединений. С учетом этих требований разработан принцип построения источников питания на базе тиристорных преобразователей. Опытные образцы источников питания

прошли испытания в производственных условиях и внедрены в Томском конструкторском бюро "Проект" (1988 г.), в СКБ научного приборостроения "Оптика" СО АН СССР (1985 г.) и в ОАО "Новосибирский завод химконцентратов" (1996 г.).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Взаимосвязь параметров мостового тиристорного преобразователя с электромагнитными коммутационными процессами при смене полярности тока в сварочной цепи.

2. Результаты экспериментальных исследований начального возбуждения и физической устойчивости дуги переменного прямоугольного тока.

3. Механизм воздействия амплитудно-временных параметров переменного прямоугольного тока на пространственную устойчивость дуги.

4. Требования к способам и средствам управления процессом аргодуговой сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов малых толщин.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на областном семинаре "Сварка и пайка в приборостроении" (Пенза, 1981 г.), на 2-й Всесоюзной конференции по сварке цветных металлов (Ташкент, 1982 г.), на областной научно-практической конференции "Машиностроению - прогрессивную технологию и высокое качество деталей" (Тольятти, 1983 г.), на 5-й Всесоюзной научно-практической конференции "Автоматизация новейших электротехнологических процессов в машиностроении на основе применения полупроводниковых преобразователей частоты с целью экономии материальных, трудовых и энергетических ресурсов" (Уфа, 1984 г.), на научно-технической конференции сварщиков Урала и Казахстана "Сварка модулированным током" (Караганда, 1985 г.), на Всесоюзном семинаре "Применение импульсных процессов в сварке" (Ростов-на-Дону, 1987 г.), на объединенном заседании секций Научного и Координационного советов по сварке "Источники питания и системы автоматического управления сварочным оборудованием" и "Оборудование для дуговой сварки" (Алма-Ата, 1990 г.), на 1-й научно-практической конференции сварщиков Средней Азии и Казахстана (Караганда, 1991 г.), на международной научно-технической конференции "Современные проблемы сварочной науки и техники" (Ростов-на-Дону, 1993 г.), на Российской научно-технической

конференции "Современные проблемы сварочной науки и техники «Сварка-97»" (Воронеж, 1997 г.). Разработанный источник питания для сварки алюминиевых сплавов малых толщин демонстрировался на Всесоюзной выставке "Вузы РСФСР машиностроению" (Тольятти, 1983 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы (162 наименования) и приложения. Работа выполнена на 185 страницах, содержит 79 рисунков, 20 таблиц, 4 страницы приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена цель исследований, научная новизна результатов и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу технологических особенностей аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов неплавящимся электродом и схемных решений источников питания, который показал, что изготовление сварных изделий из тонкостенных алюминиевых сплавов является сложной задачей. Обусловлено это их специфическими физико-химическими свойствами, предъявляющими ряд требований к технологии сварки и источнику питания. В частности, необходимо обеспечивать высокую скорость сварки и устойчивость горения дуги, концентрированный ввод тепла в изделие, катодное распыление поверхностной оксидной пленки, воздействие на металл низкочастотных колебаний. С этой точки зрения наиболее перспективным является способ аргонодуговой сварки неплавящимся электродом переменным прямоугольным током, который получил развитие в 60-х годах. В работах Е.Вилкас, Д.М.Рабкина, Г.А.Славина, Г.М.Коротковой, А.Я.Ищенко, И.В.Пентегова, S.Kokuga и других авторов показаны преимущества этого способа сварки, которые заключаются в следующем. Во-первых, повышается стабильность горения дуги за счет сокращения длительности коммутационных процессов при смене полярности тока. Во-вторых, расширяются технологические возможности процесса сварки за счет отдельного регулирования амплитудно-временных параметров режима горения дуги прямой и обратной полярности. Для реализации этого способа сварки

разработано множество схемных решений источников питания, которые можно разделить на следующие типы:

- а) преобразующие однофазный переменный синусоидальный ток сварочного трансформатора;
- б) преобразующие постоянный ток сварочного выпрямителя;
- в) с индуктивными накопителями энергии;
- г) с промежуточным высокочастотным преобразованием энергии питающей сети.

Проведенный анализ показал, что при разработке процесса сварки алюминиевых сплавов переменным прямоугольным током и соответствующих источников питания основное внимание было уделено проблеме формирования в сварочной цепи разнополярных прямоугольных или близких к ним по форме импульсов тока, обеспечивающих независимое регулирование энергии дуги прямой и обратной полярности. При этом, несмотря на сокращение длительности коммутационных процессов при смене полярности, повторное возбуждение дуги обратной полярности практически во всех известных схемных решениях осуществляется (в связи с наличием бестоковой паузы из-за особенностей работы полупроводниковых преобразователей) по аналогии с синусоидальной формой тока - путем пробоя межэлектродного промежутка импульсом высокого напряжения.

Таким образом, до настоящего времени преимущества данного способа сварки, несмотря на 30-летний период его известности, в полной мере не реализованы. Об этом говорит тот факт, что, например, в России промышленное применение переменного прямоугольного тока для целей сварки до сих пор обеспечивается лишь благодаря использованию специализированных установок типа ТИР-300 (разработка НИКИМТ), которые реализуют только одно из преимуществ такой формы тока: сокращают длительность коммутационных процессов при смене полярности.

Сдерживающим фактором развития технических средств для реализации данного способа сварки и, соответственно, расширения его технологических возможностей является то, что известные результаты исследований получены при относительно больших действующих значениях переменного прямоугольного тока (свыше 100А). При этом практически отсутствуют сведения об особенностях начального и повторного возбуждения дуги, её физической и пространственной устойчивости.

В конце первой главы на основе проведенного анализа литературных данных сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе изложены результаты исследований коммутационных электромагнитных процессов в тиристорном преобразователе. Исходя из существенных преимуществ систем питания дуги, основанных на принципе преобразования постоянного тока, была разработана схема мостового тиристорного преобразователя с принудительной коммутацией последовательного типа (рис.1). Особенностью предложенной схемы является то, что часть энергии коммутирующего контура при отключении тока дуги одной полярности используется для повторного возбуждения дуги другой полярности. Коммутационные процессы в тиристорном преобразователе исследовали на математической модели с использованием метода сопряжения интервалов, внутри которых процессы в рассматриваемой цепи описываются совокупностью линейных дифференциальных уравнений. Период коммутации тока был разделен на пять интервалов, расчетные схемы замещения для которых приведены на рис.2. Решение систем дифференциальных уравнений на каждом интервале выполняли операторным методом при соответствующих начальных условиях.

Ток в цепи нагрузки на первом интервале описывается уравнением

$$i_1(t) = I_{10} - \frac{(1+k)E_2 + E_d - E_1}{L_2 + (1-k^2)L_3} \cdot t, \quad (1)$$

где I_{10} – ток дуги перед сменой полярности; $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_3}} = \frac{M}{L_3}$ – коэффициент

взаимной индуктивности обмоток коммутирующего трансформатора.

На втором интервале зависимость напряжения на межэлектродном промежутке от параметров схемы определяется выражением

$$U_3(t) = [(1+k)E_2 - E_1] \cdot \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{R \cdot t}{L_2 + (1-k^2)L_3} \right] \right\}, \quad (2)$$

где R – сопротивление межэлектродного промежутка. Вторым интервал заканчивается в момент, когда напряжение на межэлектродном промежутке становится равным напряжению возбуждения дуги.

На третьем интервале ток в цепи нагрузки описывается уравнением

$$i_1(t) = I_{12} + \left[\frac{(1+k)E_2 - E_1 - E_d}{L_2 + (1-k^2)L_3} \right] \cdot t, \quad (3)$$

где I_{12} – ток в цепи нагрузки в конце второго интервала. Третий интервал заканчивается одновременно с интервалом рассасывания

избыточных зарядов в

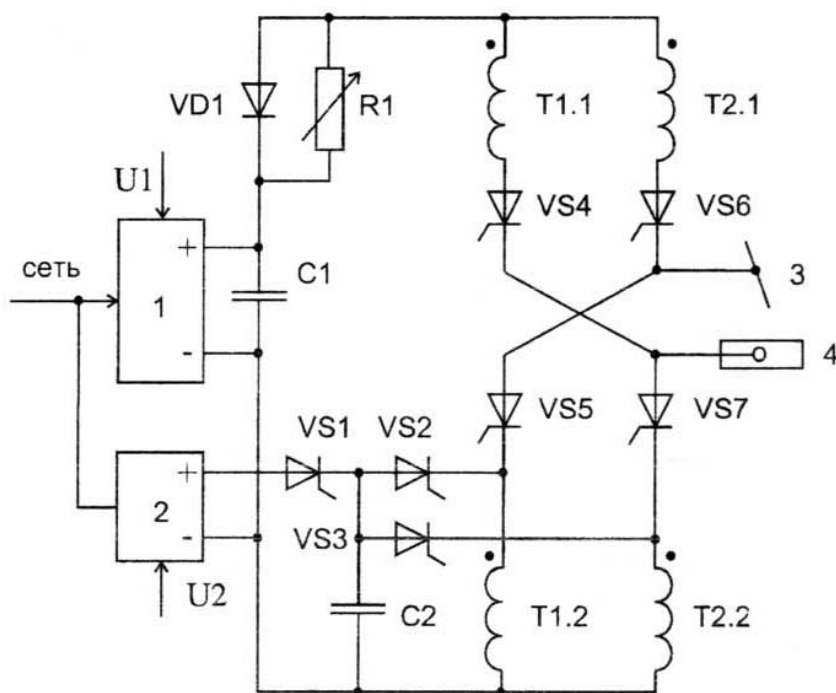


Рис. 1. Функциональная схема тиристорного преобразователя: 1 - сварочный выпрямитель; 2 - зарядный выпрямитель с регулируемым напряжением; R1 - балластный реостат; C1 - конденсатор фильтра; VD1 - обратный диод; VS1 - зарядный тиристор; C2 - коммутирующий конденсатор; VS2, VS3 - коммутирующие тиристоры; T1, T2 - коммутирующие трансформаторы; VS4... VS7 - тиристоры инвертора; 3 - вольфрамовый электрод; 4 - изделие из алюминиевого сплава.

тиристорах. Длительность его равна $t_3 = 0,15 \cdot t_{\text{вык}} - t_2$, где $t_{\text{вык}}$ - время выключения тиристора; t_2 - длительность второго интервала.

Зависимость тока дуги от параметров схемы на четвертом интервале описывается выражением

$$i_{\text{н}}(t) = \frac{(E_1 - E_{\text{н}}) \cdot t + L_2 \cdot I_{13}}{L_2 + 2(1+k)L_3} + \left[1 - \frac{L_2}{L_2 + 2(1+k)L_3} \right] \cdot I_{13} \exp\left(-\frac{t}{0,04 \cdot t_{\text{БКК}}}\right), \quad (4)$$

где I_{13} - ток в цепи нагрузки в конце третьего интервала. Длительность четвертого интервала равна $t_4 \sim 0,1 \cdot t_{\text{вык}}$

На пятом интервале ток в цепи нагрузки описывается уравнением

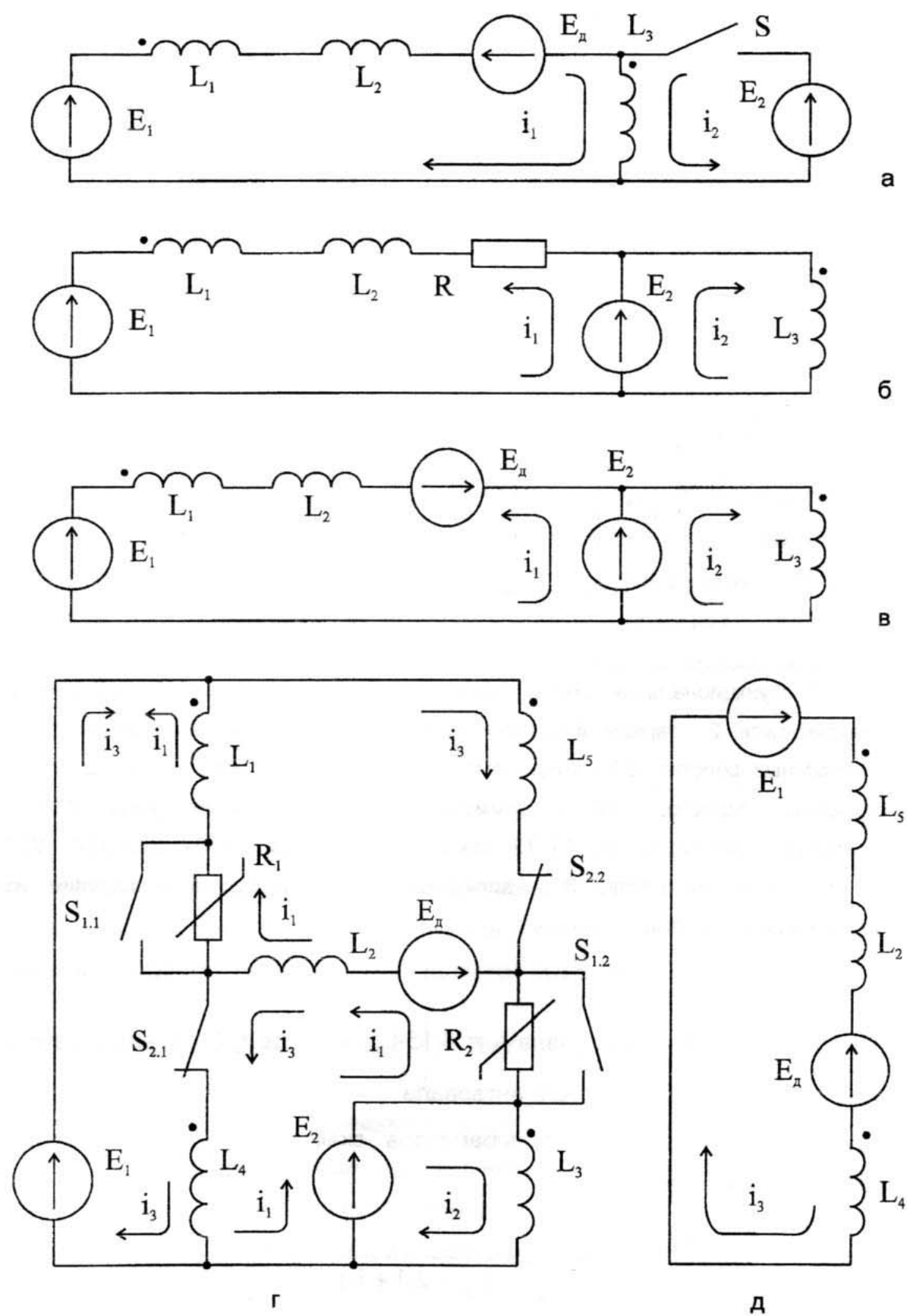


Рис. 2. Расчетные схемы замещения: а - для первого интервала; б - для второго; в - для третьего; г - для четвертого; д - для пятого.

$$i_3(t) = i_d(t) = I_{d4} + \frac{E_1 - E_d}{L_2 + 2(1+k)L_3} \cdot t, \quad (5)$$

где I_{d4} - ток дуги в конце четвертого интервала. В течение пятого интервала ток дуги нарастает до установившегося значения и, следовательно, коммутационные процессы завершаются.

На основе разработанной математической модели тиристорного преобразователя рассчитаны и построены зависимости, отражающие влияние параметров преобразователя на длительность отключения тока дуги перед сменой полярности, на величину напряжения на межэлектродном промежутке после смены полярности и характер изменения тока после возбуждения дуги. Их анализ показывает, что закон изменения тока в цепи нагрузки практически не зависит от его направления. Надежное повторное возбуждение дуги прямой и обратной полярности обеспечивается за счет высокой скорости нарастания напряжения до соответствующего уровня. При этом длительность бестоковой паузы после гашения дуги предыдущей полярности не превышает 1 мкс.

С целью определения достоверности описания коммутационных электромагнитных процессов математической моделью были проведены экспериментальные исследования на действующем тиристорном преобразователе. Для регистрации тока использовали коаксиальный шунт (индуктивность - $4,3 \cdot 10^{-9}$ Гн, постоянная времени - $4 \cdot 10^{-8}$ с).

Анализ осциллограмм, снятых при работе тиристорного преобразователя на сварочную дугу, горящую в среде аргона между вольфрамовым электродом и изделием из алюминиевого сплава, и результатов оценки достоверности расчетных соотношений, показал, что математическая модель качественно верно отражает коммутационные электромагнитные процессы при смене полярности тока. При этом предложенная схема тиристорного преобразователя по своим параметрам и динамическим свойствам в полной мере отвечает специфическим требованиям, предъявляемым дугой переменного тока.

В третьей главе изложены результаты исследования процесса начального и повторного возбуждения дуги переменного прямоугольного тока и устойчивости её горения. Надежность начального возбуждения дуги исследовали на установке, которая обеспечивает регистрацию высоковольтных импульсов, осуществляющих электрический пробой межэлектродного промежутка, и амплитудно-временных параметров тока и напряжения в сварочной цепи в процессе формирования дугового разряда. Состояние

рабочей поверхности электродов изменяли путем предварительного воздействия дуги переменного тока в среде аргона при разных режимах её горения.

Установлено, что начальное возбуждение малоамперной дуги (3...12 А) в среде аргона между вольфрамовым электродом и изделием из алюминиевого сплава бесконтактным или контактным способом следует осуществлять при обратной полярности питающего напряжения. В этом случае, независимо от марки вольфрамового электрода, состояния его рабочей поверхности и марки алюминиевого сплава, для возбуждения дуги необходимо обеспечить электрический пробой межэлектродного промежутка одним импульсом высокого напряжения или кратковременное соприкосновение электродов. Полученные результаты объясняются практически безынерционным процессом автоэлектронной эмиссии с окисленной поверхности катода из алюминиевого сплава. При прямой полярности питающего напряжения надежность начального возбуждения дуги существенно зависит от марки вольфрамового электрода, состояния его рабочей поверхности и снижается с уменьшением заданной величины тока.

С учетом рекомендаций по начальному возбуждению дуги была разработана методика эксперимента по определению надежности повторного возбуждения дуги при первой смене полярности тока в сварочной цепи с обратной на прямую (рис.3). Питание сварочной цепи осуществляли от тиристорного преобразователя. Варьируемыми параметрами при проведении многофакторного эксперимента являлись: ток импульса дуги обратной полярности $I_{и}$; длительность импульса тока обратной полярности $t_{и}$ скорость изменения тока при смене полярности dI/dt ; диаметр оплавленной части рабочей поверхности вольфрамового электрода $d_{оп}$. Уровни и интервалы варьирования факторов приведены в табл.1. Откликами являлись амплитудные значения напряжения $U_{пп}$ и тока $I_{пп}$ дугового разряда прямой полярности по которым рассчитывали сопротивление межэлектродного промежутка.

В результате математической обработки экспериментальных данных получено уравнение, описывающее влияние варьируемых факторов на сопротивление межэлектродного промежутка

$$R = 14,58 - 0,146 \cdot I_{и} - 29,68 \cdot t_{и} - 2,76 \cdot d_{оп} - 0,18 \cdot dI/dt + \\ + 0,205 \cdot I_{и} \cdot t_{и} - 0,012 \cdot I_{и} \cdot d_{оп} + 16,07 \cdot t_{и} \cdot d_{оп}. \quad (6)$$

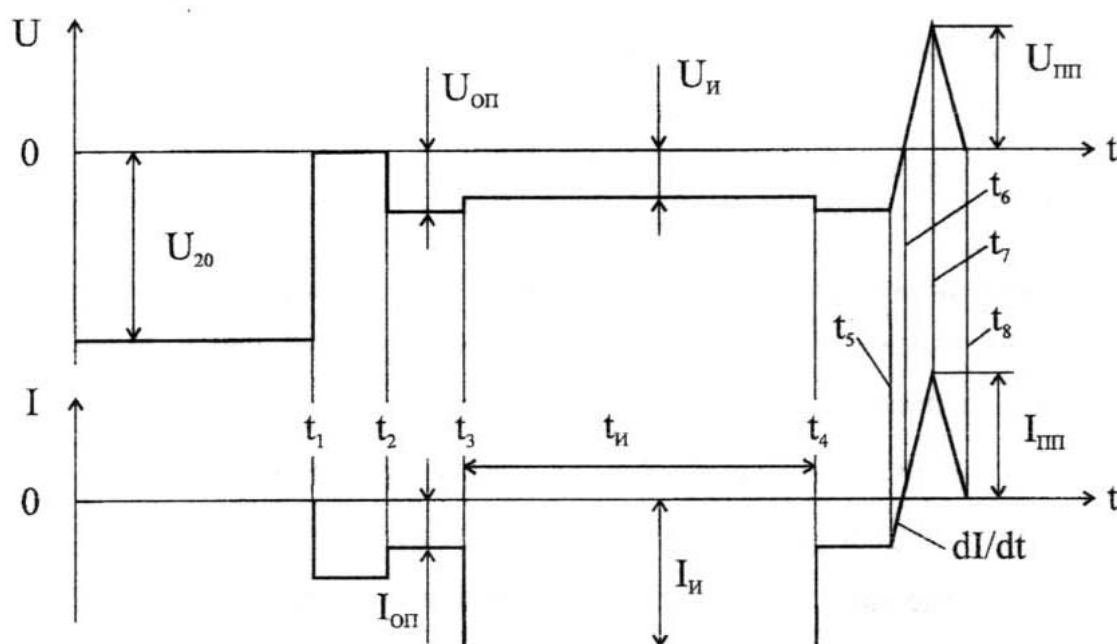


Рис. 3. Эпюры напряжения между электродами и тока в сварочной цепи.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование	Факторы и их кодированное обозначение			
	$I_{н}, A$	$t_{н}, c$	$d_{оп}, мм$	$dI/dt, MA/c$
Основной уровень	35	0,23	1,20	5,05
Интервал варьирования	20	0,1	0,28	2,66
Верхний уровень (+)	55	0,33	1,48	7,71
Нижний уровень (-)	15	0,13	0,92	2,39

Анализ уравнения (6) показывает, что сопротивление межэлектродного промежутка, которое определяет величину напряжения повторного возбуждения дуги прямой полярности, уменьшается при увеличении амплитуды и длительности импульса тока обратной полярности, скорости изменения тока при смене полярности и уменьшении диаметра рабочей поверхности вольфрамового электрода. Оптимальные значения варьируемых факторов должны обеспечивать равенство напряжений возбуждения и горения дуги. Это возможно при условии

$$R = R_d(i), \quad (7)$$

где R - сопротивление межэлектродного промежутка в момент возбуждения дуги; $R_d(i)$ - сопротивление дуги прямой полярности при заданном значении тока.

Экспериментально определена зависимость сопротивления дуги прямой полярности от тока, которая описывается выражением

$$R_d = 30,33 \cdot I^{-1,29} \quad (8)$$

Приравнивая правые части уравнений (6) и (8) получим, в соответствии с условием (7), зависимость варьируемых параметров от заданной величины тока дуги прямой полярности (I)

$$14,58 - 0,146 \cdot I_{II} - 29,68 \cdot t_{II} - 2,76 \cdot d_{OII} - 0,18 \cdot dI/dt + \\ + 0,205 \cdot I_{II} \cdot t_{II} - 0,012 \cdot I_{II} \cdot d_{OII} + 16,07 \cdot t_{II} \cdot d_{OII} = 30,33 \cdot I^{-1,29}. \quad (9)$$

При исследовании особенностей повторного возбуждения дуги обратной полярности установлено, что, несмотря на высокую скорость изменения тока при смене полярности (более 2 МА/с) и малую длительность бестоковой паузы (менее 1 мкс), напряжение возбуждения дуги обратной полярности значительно превышает напряжение горения дуги. С увеличением длительности горения напряжение повторного возбуждения дуги обратной полярности повышается и достигает максимального значения, равного 125...225В, в момент появления признаков плавления алюминиевого сплава. С увеличением действующего значения тока этот процесс протекает более интенсивно. Такие условия повторного возбуждения дуги обратной полярности определяются состоянием поверхности катода из алюминиевого сплава и связаны с уменьшением толщины оксидной пленки и её удалением в результате катодного распыления. Из этого следует, что одним из условий стабильного горения дуги переменного прямоугольного тока является подача на межэлектродный промежуток в момент смены полярности кратковременных импульсов высокого напряжения, амплитуда которых должна превышать напряжение повторного возбуждения дуги обратной полярности, т.е. не менее 225 В.

С целью выявления причин нарушения устойчивости дуги переменного прямоугольного тока, были проведены экспериментальные исследования при воздействии таких возмущающих факторов, как увеличение межэлектродного расстояния и уменьшение действующего значения тока до критической величины. В качестве неплавящегося электрода использовали прутки марки ЭВЧ диаметром 1,0 мм и марки ЭВЛ диаметром 2,0 мм. В качестве изделия

служила пластина из сплава АМг6 размером 100-50-10 мм.

Таблица 2

Параметры режима

Действующее значение тока, А	5...25
Частота смены полярности, Гц	20...200
Соотношение периодов горения дуги прямой и обратной полярности	2/1...9/1
Начальное межэлектродное расстояние, мм	2
Расход защитного газа (аргона), л/мин	5
Скорость изменения тока при смене полярности, МА/с	2,39...7,71
Напряжение холостого хода источника питания, В	62
Напряжение заряда коммутирующего конденсатора, В	200

Результаты эксперимента показали, что при заданных параметрах режима (табл.2) гашение дуги переменного прямоугольного тока происходит в период протекания в сварочной цепи тока прямой полярности. Ни одного случая нарушения повторного возбуждения дуги зарегистрировано не было, что свидетельствует о высокой устойчивости динамического режима дуги при смене полярности тока. Отмечено, что увеличение межэлектродного расстояния в процессе горения дуги, а также принудительное уменьшение тока при фиксированном расстоянии между электродами, приводит к значительной асимметрии её электрических параметров при прямой и обратной полярности тока. При этом напряжение дуги прямой полярности становится больше напряжения дуги обратной полярности и достигает в критический момент значения, соответствующего напряжению холостого хода источника питания. Из этого следует, что устойчивость малоамперной дуги переменного прямоугольного тока определяется условиями её горения в период прямой полярности и зависит от заданной величины тока и электрофизических свойств вольфрамового электрода.

В четвертой главе изложены результаты исследования пространственной устойчивости дуги переменного прямоугольного тока и её силовых характеристик.

Экспериментальные исследования с использованием скоростной киносъемки и секционированного изделия показали, что отклонение дуги в период протекания тока обратной полярности от оси вольфрамового электрода

связано с перемещением катодных пятен. При токе менее 5 А отклонение дуги от оси электрода незначительно, так как катодные пятна интенсивно перемещаются лишь по окисленной поверхности алюминиевого сплава, непосредственно прилегающей к расплаву сварочной ванны. Увеличение тока до 10 А и более способствует расширению зоны перемещения катодных пятен и, следовательно, большему отклонению дуги от оси вольфрамового электрода.

В начальный период горения дуги прямой полярности расположение её в пространстве совпадает с предыдущим расположением дуги обратной полярности, что свидетельствует о формировании анодного пятна в месте предыдущего сосредоточения катодных пятен и связано с остаточными явлениями в межэлектродном промежутке и на поверхности электродов при нулевом значении тока. Экспериментально установлено и теоретически обосновано, что при сварке алюминиевых сплавов в широком диапазоне действующих значений переменного прямоугольного тока пространственное положение дуги прямой полярности стабилизируется и занимает соосное с вольфрамовым электродом положение при ограничении тока до 5 А на завершающем этапе горения дуги обратной полярности.

С целью расширения возможностей по управлению технологическими свойствами дуги переменного прямоугольного тока были проведены экспериментальные исследования её силовых характеристик в области малых действующих значений тока. Давление дуги измеряли манометрическим способом. Для этой цели использовали анализатор давления (постоянная времени $1,45 \cdot 10^{-3}$ с). Варьируемыми параметрами режима являлись (рис.4): ток паузы прямой полярности I_{Π} , ток импульса прямой полярности $I_{И}$, ток обратной полярности I_0 и длительность паузы тока прямой полярности t_{Π} . Исходя из того, что при равной величине тока давление дуги прямой полярности значительно превышает давление дуги обратной полярности и, соответственно, определяет среднее значение давления дуги переменного тока, откликом эксперимента было выбрано давление дуги в период протекания тока прямой полярности.

В результате математической обработки данных многофакторного эксперимента получено уравнение

$$P = - 11,08 - 13,71 \cdot I_{\Pi} + 5,96 \cdot I_{И} - 3,07 \cdot I_0 + 4159,96 \cdot t_{\Pi} - 0,074 \cdot I_{\Pi} \cdot I_{И} + 1,98 \cdot I_{\Pi} \cdot I_0 - 0,36 \cdot I_{И} \cdot I_0. \quad (10)$$

Анализ уравнения (10) показывает, что давление дуги в период протекания тока прямой полярности повышается при увеличении тока импульса прямой полярности $I_{и}$ и длительности паузы тока паузы прямой полярности $t_{п}$, а также при уменьшении тока паузы прямой полярности $I_{п}$ и тока обратной полярности $I_{о}$. Расчетные зависимости давления дуги от каждого из варьируемых факторов (при неизменных остальных) представлены на рис.5.

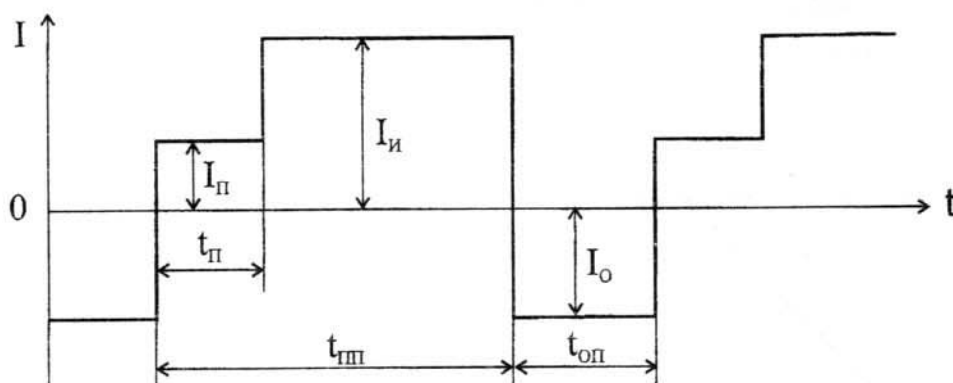


Рис.4. Временная диаграмма тока дуги.

Концентрацию ввода тепла в изделие оценивали по радиальному распределению давления дуги в период протекания тока прямой полярности. В частности, определяли влияние наиболее просто поддающейся регулировке длительности паузы тока прямой полярности. При этом результаты сопоставляли с аналогичной характеристикой дуги постоянного тока прямой полярности. Анализ полученных результатов показал, что радиальное распределение давления дуги подчиняется нормальному закону (рис.6). Расчеты показали, что при исследованных параметрах коэффициент контрагирования потока плазмы дуги постоянного тока прямой полярности соответствует значению $\alpha = 1,1 \text{ мм}^{-2}$. Питание дуги переменным током с прямоугольной формой волны при минимальной длительности паузы тока прямой полярности вызывает рассредоточение потока плазмы в период протекания тока импульса прямой полярности. Об этом свидетельствует уменьшение коэффициента контрагирования ($\alpha = 1,0 \text{ мм}^{-2}$). Увеличение длительности паузы тока прямой полярности способствует повышению давления дуги в период действия импульса тока прямой полярности и сосредоточению потока плазмы. В частности, при длительности паузы

тока прямой полярности $8 \cdot 10^{-3}$ с коэффициент контрагирования достигает значения $\alpha = 1,4 \text{ мм}^{-2}$.

Таким образом, экспериментально установлено, что соответствующая модуляция параметров режима горения дуги переменного прямоугольного тока способствует не только повышению давления дуги и её пространственной устойчивости в период действия импульса тока прямой полярности, но и сосредоточению потока плазмы дуги. Все это в комплексе повышает концентрацию ввода тепла в свариваемое изделие и, следовательно, эффективность данного источника нагрева.

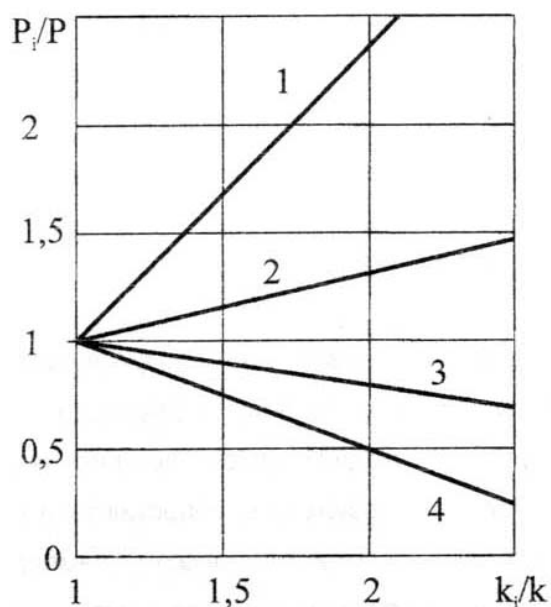


Рис.5. Зависимость давления дуги в период протекания тока прямой полярности от варьируемого фактора: $P_i/P=1$ при $I_{п}=3 \text{ А}$, $I_{н}=20 \text{ А}$, $I_0=6 \text{ А}$, $t_{п}=4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Варьируемый фактор (k): 1 - $I_{н}$; 2 - $t_{п}$; 3 - $I_{п}$; 4 - I_0 .

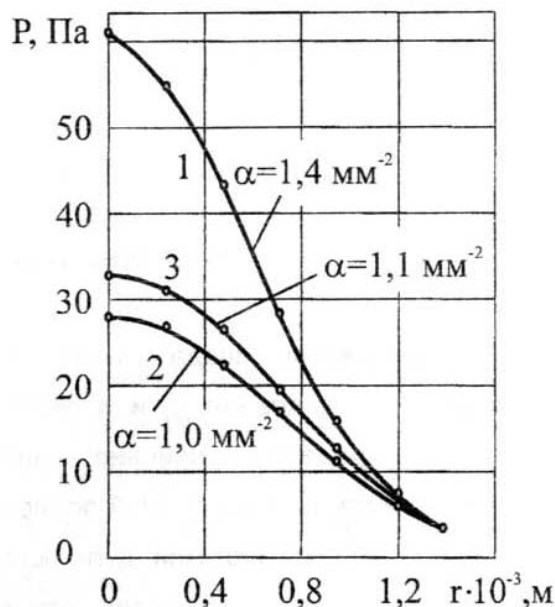


Рис.6. Радиальное распределение давления дуги: 1 - переменный ток ($I_{н}=20 \text{ А}$, $I_{п}=3 \text{ А}$, $I_0=8 \text{ А}$, $t_{п}=8 \cdot 10^{-3} \text{ с}$); 2 - переменный ток ($I_{н}=20 \text{ А}$, $I_{п}=3 \text{ А}$, $I_0=8 \text{ А}$, $t_{п}=2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$); 3 - постоянный ток ($I_{ср}=20 \text{ А}$).

Пятая глава посвящена разработке оборудования и технологических рекомендаций по сварке. При разработке технологических рекомендаций установлено, что проплавляющая способность дуги переменного прямоугольного тока зависит от алгоритма модуляции и повышается при переходе от непрерывного режима горения дуги к импульсному и от

импульсного к пульсирующему. Сварные соединения, выполненные с применением тиристорного преобразователя имеют более высокую пластичность и вязкость, чем при использовании серийного источника питания типа ТИР-ЗООДМ, причем значения этих величин возрастают по мере перехода от непрерывного характера ввода тепловой энергии к пульсирующему. Прочностные свойства сварных соединений мало зависят от применяемого источника питания (формы тока). Однако разброс значений показателей механических свойств значительно ниже для образцов, выполненных с применением тиристорного преобразователя, что объясняется высокой пространственной устойчивостью дуги. Установлено, что при кристаллизации металла шва с дискретным вводом тепловой энергии (импульсный или пульсирующий режим), образуется слоистая мелкозернистая структура без центрального кристаллита. Причем наибольший эффект измельчения структуры проявляется при сварке пульсирующей дугой с наложением во время паузы дополнительных кратковременных импульсов тока.

Проведенные исследования позволили сформулировать требования к способам и средствам управления процессом аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов переменным прямоугольным током неплавящимся электродом. Эти требования были реализованы при разработке специализированных установок, которые внедрены в СКБ научного приборостроения "Оптика" (г.Томск, 1985 г.), в КБ "Проект" (г.Томск, 1988 г.), в ОАО "Новосибирский завод химконцентратов" (г.Новосибирск, 1996 г.).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель тиристорного преобразователя, позволяющая определять оптимальные параметры элементов схемы и их влияние на электромагнитные процессы при смене полярности тока.

2. Экспериментально установлено, что начальное возбуждение дуги между вольфрамовым электродом и изделием из алюминиевого сплава бесконтактным или контактным способом следует осуществлять при обратной полярности питающего напряжения и заданной величине тока 3...5 А.

3. Для надежного повторного возбуждения дуги переменного прямоугольного тока при первой смене полярности с обратной на прямую необходимо программировать режим горения дуги обратной полярности таким

образом, чтобы сопротивление межэлектродного промежутка после её гашения было соизмеримо с сопротивлением дуги прямой полярности при заданной величине тока. Для повторного возбуждения дуги обратной полярности необходимо кратковременно прикладывать к межэлектродному промежутку напряжение с амплитудой не менее 225В.

4. Устойчивость горения дуги переменного прямоугольного тока при соблюдении условий, обеспечивающих надежное повторное возбуждение дуги прямой и обратной полярности, соизмерима с устойчивостью дуги постоянного тока прямой полярности и определяется заданной величиной тока и электрофизическими свойствами вольфрамового электрода.

5. В период протекания тока обратной полярности отклонение дуги связано с интенсивным перемещением катодных пятен по окисленной поверхности алюминиевого сплава, а в начальный период протекания тока прямой полярности пространственное положение дуги определяется местом формирования анодного пятна, которое совпадает с предыдущим сосредоточением катодных пятен. Экспериментально установлено, что пространственное положение дуги прямой полярности стабилизируется в случае кратковременного ограничения тока дуги обратной полярности до уровня 5 А на завершающем этапе её горения.

6. Установлено, что при увеличении тока импульса прямой полярности и длительности паузы тока прямой полярности, а также при уменьшении тока паузы прямой полярности и тока обратной полярности увеличивается коэффициент контрагирования плазменного потока и амплитудное значение давления дуги прямой полярности и, соответственно, повышается её пространственная устойчивость.

7. Применение пульсирующего режима горения дуги с наложением дополнительных импульсов тока малой длительности в период низкого энергетического уровня обеспечивает улучшение свойств сварных соединений.

8. Разработан мостовой тиристорный преобразователь постоянного тока в переменный прямоугольный, который позволяет осуществлять амплитудную и временную модуляцию параметров режима и в полной мере отвечает специфическим требованиям процесса сварки алюминиевых сплавов неплавящимся электродом в среде аргона. Результаты исследований внедрены на трех промышленных предприятиях и используются при изготовлении сварных конструкций из алюминиевых сплавов толщиной 0.5...3 мм.

Основные публикации по теме диссертации

1. Князьков А.Ф., Киселев А.С. Исследование устойчивости горения малоамперной дуги переменного тока с прямоугольной формой волны. В кн.: Тез. докл. к областному семинару "Сварка и пайка в приборостроении". Пенза, 1981.-С.17-18.
2. Князьков А.Ф., Киселев А.С., Зуев В.М. Источник питания для сварки алюминиевых сплавов малых толщин - В кн.: Тез. докл. областной научно-практической конференции "Машиностроению - прогрессивную технологию и высокое качество деталей".- Тольятти, 1983.- С.36.
3. Князьков А.Ф., Киселев А.С. Управляемый источник питания для сварки неплавящимся электродом - В кн.: Тез докл. V Всесоюзной научно-практической конференции "Автоматизация новейших электротехнологических процессов в машиностроении на основе применения полупроводниковых преобразователей частоты с целью экономии материальных, трудовых и энергетических ресурсов".-Уфа, 1984.-С.40.
4. Болдырев А.М., Князьков А.Ф., Киселев А.С. Возбуждение дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом переменным прямоугольным током модулированным по амплитуде - В кн.: Тез. докл. научно-технической конференции сварщиков Урала и Казахстана "Сварка модулированным током".- Караганда, 1985.-С. 18-19.
5. Князьков А.Ф., Киселев А.С. Питание дуги переменным прямоугольным током при сварке алюминиевых сплавов. - В кн.: Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Докл. II Всесоюзной конф.- Киев: Наукова думка, 1985.- С.145-147.
6. Киселев А.С., Князьков А.Ф., Болдырев А.М. Влияние модуляции переменного тока с прямоугольной формой волны на силовое воздействие дуги - В кн.: Тез. докл. на Всесоюзн. семинаре "Применение импульсных процессов в сварке" Ростов-на-Дону, 1987.-С.24-25.
7. Киселев А.С. Исследование пространственной устойчивости дуги переменного тока с прямоугольной формой волны - В кн.: Тез. докл. 1-й научно-практической конференции сварщиков Средней Азии и Казахстана. Караганда, 1991.-С.12-13.
8. Киселев А.С. Влияние формы импульсов сварочного тока на структуру и свойства сварных соединений из алюминиевых сплавов - В кн.: Тез. докл. международной научно-технической конференции "Современные проблемы

сварочной науки и техники", Ростов-на-Дону, 1993,- С.115-116.

9. Киселев А.С. Особенности повторного возбуждения дуги при сварке алюминиевых сплавов вольфрамовым электродом в среде аргона - В кн.: Прогрессивные технологические процессы в машиностроении, Томск, 1997.- С.127-132.

10. Киселев А.С. Исследование электромагнитных процессов в сварочной цепи при смене полярности переменного прямоугольного тока - В кн.: Материалы Российской научно-технической конференции "Современные проблемы сварочной науки и техники «Сварка-97», Воронеж, 1997.- С.34-35.

11. А.с. 1006126 СССР, МКИ В23К9/16. Способ дуговой сварки неплавящимся электродом / А.Ф. Князьков, А.С. Киселев. № 3350172/25-27; Заявл. 22.10.81; Оpubл. 23.03.83, Бюл. № 11 //Открытия. Изобретения.1983.

12. А.с. 1074675 СССР, МКИ В23К 9/10. Датчик коротких замыканий дугового промежутка / А.Ф.Князьков, Ю.Н.Сараев, А.С.Киселев и др. - № 3539538/25-27; Заявл. 17.01.83; Оpubл. 23,02.84, Бюл. № 7 // Открытия. Изобретения.- 1984.

13. А.с. 1100056 СССР, МКИ В23К 9/00. Устройство для сварки переменным прямоугольным током / А.Ф.Князьков, А.С.Киселев, В.М.Зуев.- № 3537929/ 25-27, Заявл. 12.01.83; Оpubл. 30.06.84, Бюл, № 24 // Открытия. Изобретения.- 1984.

14. А.с. 1238919 СССР, МКИ В23К 9/09. Устройство для сварки/А.Ф.Князьков, Б.Г.Долгун, А.С.Киселев и др.- № 3845223/25-27; Заявл. 15.01.85; Оpubл. 23.06.86, Бюл. №23 // Открытия. Изобретения.1986.

15. А.с. 1266687 СССР, МКИ В23К 9/16. Способ дуговой сварки алюминиевых сплавов на переменном токе неплавящимся электродом / А.Ф.Князьков, А.М.Болдырев, А.С.Киселев.- № 3916400/25-27; Заявл. 24.06.85; Оpubл. 30.10.86, Бюл. № 40 // Открытия. Изобретения.1986.