М352797

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее
техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

КОЛЬВАХ Владимир Федорович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ ТРИМЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗА

(специальность 05.04.05 – Технология и машины
сварочного производства)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва 1979

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель
доктор техн. наук,
профессор О.Н.Браткова

Официальные оппоненты:

доктор техн. наук
профессор Б.Д.Орлов

кандидат техн. наук
доцент Д.М.Шашин

Ведущее предприятие указано в решении специализированного Совета

Защита состоится "___" _____ 1979 г.
...ого совета по технологии и
...Московского ордена Ленина
...ени высшего технического
...у: г.Москва, 107005, 2-я

...заверенные печатью, просим

...ся в библиотеке МВТУ

"___"_____1979 г.

...рованного совета

В.М.Ямпольский

МВТУ им. Н.Э. Баумана ЧИТАЛЬНАЯ ЗАЛ

М352797

А77356 Объем 1 п.л.
тир 100 экз.

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1352797
Кольвах В.Ф.Разработка и

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. При производстве многих типов электровакуумных приборов некоторые высокотемпературные элементы конструкций внутренней арматуры изготавливаются из листовых триметаллов на основе алюминированного железа. При этом наиболее широко используются триметаллы следующих типов: алюминий-железо-алюминий (АЖА), алюминий-железо-никель (АЖН), алюминий-железо-медь (МЖА).

В соответствии с условиями эксплуатации, испытаний и монтажа приборов, требуется обеспечение достаточно высокой прочности соединений деталей из триметаллов между собой или с другими элементами внутренней арматуры. Для получения неразъемных соединений используются методы склепывания и точечной контактной сварки. Ввиду того, что сборка большинства узлов приборов производится с использованием точечной контактной сварки, соединение деталей из рассматриваемых триметаллов склепыванием удорожает общий технологический процесс монтажа из-за проведения дополнительных операции, использования специализированного оборудования, увеличения материалоемкости и низкой производительности. Между тем, использование высокопроизводительного метода точечной контактной сварки триметаллов ограничивается низкой стабильностью прочности соединений и возможностью появления выплесков.

М352797

Цель работы. Целью настоящей работы явилось повышение качества соединений деталей толщин 0,1-0,4 мм из триметаллов на основе алюминированного железа методом точечной контактной сварки применительно к конструкциям электровакуумных приборов.

Методы исследования. Работа выполнена теоретическими и экспериментальными методами. При исследовании динамики нагрева свариваемых деталей и анализе электрических процессов в управляемых тиристорных источниках сварочного тока применялось математическое моделирование этих явлений с помощью соответствующих систем дифференциальных уравнений. В качестве методов экспериментальных исследований использовались: механические испытания сварных соединений на срез, металлографический анализ шлифов соединений, осциллографирование и измерение электрических и тепловых параметров сварочных процессов и электрических процессов в источниках сварочного тока. Для проведения экспериментальных исследований разработано специализированное сварочное и измерительное оборудование. При получении и обработке экспериментальных данных ис-

пользовались методы математической статистики и теории планирования оптимальных экспериментов.

Научная новизна. Теоретически и экспериментально доказано, что введение контактных электрического и теплового сопротивлений в математическую модель процесса нагрева деталей может осуществляться путем изменения теплофизических характеристик материалов контакта, с учетом экспериментальных временных зависимостей сопротивлений в области сварочного промежутка и геометрии линий стягивания электрического тока.

Путем теоретического анализа динамики нагрева при сварке триметаллов МЖА током частоты 400-1600 Гц установлено, что повышение частоты сварочного тока позволяет уменьшить максимальные величины температур приэлектродных зон за счет уменьшения амплитуды пульсации этих температур при сохранении их средних значений.

При сварке токами повышенных частот экспериментально показано, что стабилизация заданного закона нарастания амплитуды импульсов сварочного тока на начальной стадии процесса, и поддержание неизменной амплитуды импульсов напряжения между электродами на заключительном этапе сварки, обеспечивают отсутствие выплесков и стабилизацию прочности соединений триметаллов на основе алюминированного железа в условиях колебаний усилия сжатия и диаметра рабочей поверхности сварочных электродов.

Сформулированы требования к параметрам специализированных источников сварочного тока повышенных частот для сварки рассматриваемых триметаллов и разработана инженерная методика расчета таких источников.

Практическая ценность. Сформулированы требования к процессу и разработан источник питания для сварки триметаллов на основе алюминированного железа током повышенной частоты. Результаты исследований и разработок использованы при проектировании оборудования для сварки деталей электровакуумных приборов с целью оснащения отрасли.

Экономическая эффективность. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составляет 20 тыс. руб. на единицу оборудования.

МВТУ им. Н.Э. Баумана
ЧИТАЛЬНЫЙ ЗАЛ

Апробация работы. Основное содержание работы доложено на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пя-

тя глав, общих выводов ; содержит 194 стр., 15 таблиц, 73 иллюстрации. В списке использованной литературы приведено 206 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I посвящена анализу состояния вопроса и постановке задач исследования. В главе приведен обзор литературы, в котором обосновывается выбор триметаллов на основе алюминированного железа в качестве типовых конструкционных материалов для изготовления некоторых высокотемпературных узлов арматуры электровакуумных приборов. При этом показано, что триметалл типа МЖА, обладающий высоким коэффициентом теплового излучения в сочетании со значительной теплопроводностью в продольном направлении, является перспективным заменителем дорогостоящих никеля, молибдена, тантала и графита при изготовлении анодов ряда импульсных приборов средней мощности.

Основной характеристикой, определяющей применение рассматриваемых триметаллов в конструкциях электровакуумных приборов, является интегральный коэффициент теплового излучения, составляющий 0,8-0,9. Столь высокие значения коэффициента достигаются чернением готовых деталей путем отжига непосредственно перед сборкой. При этом, в результате взаимодействия алюминия с железом, на поверхности деталей образуется слой интерметаллидов, имеющий низкие значения удельных тепло- и электропроводности и обладающий значительной шероховатостью.

К сварным соединениям триметаллов на основе алюминированного железа предъявляются требования как по обеспечению заданных механических характеристик, так и по отсутствию различного рода дефектов типа выплесков, перекосов и т.п. При сборке детали ориентируются черненой поверхностью наружу, с целью обеспечения эффективного излучения тепла при последующей эксплуатации приборов. Для получения сварных соединений широко используется схема двухстороннего токоподвода, и в процессе сварки интерметаллические слои деталей контактируют с рабочей поверхностью сварочных электродов. Это вызывает появление значительных теплового и электрического сопротивлений переходов электрод-деталь, обусловленных как низкими значениями удельных тепло- и электропроводности интерметаллического покрытия, так и значительной шероховатостью его поверхности. При этом в процессе сварки имеет место интенсивное тепло-

выделение в приэлектродных областях, а теплоотводящая функция электродов снижается. Действие совокупности перечисленных факторов обуславливает нежелательный, для целей точечной контактной сварки, перегрев приэлектродных зон и большую степень проплавления деталей, что может вызывать выплески интерметаллида и металла ядра. Кроме того, нестабильность изменения в процессе сварки контактных сопротивлений электрод-деталь служит причиной появления разброса прочности соединений, на величину которого существенное влияние оказывают также колебания значений усилия сжатия и диаметра рабочих поверхностей сварочных электродов. Применительно к условиям массового производства перечисленные явления требуют введения операций контроля прочности соединений и зачистки выплесков, обладающих высокой трудоемкостью, низкой эффективностью и снижающих производительность труда монтажно-сварочного персонала.

Особые трудности вызывает сварка триметалла МХА. При сварке "медь к меди", источники джоулева тепла практически полностью локализуются в приэлектродных областях за счет значительных переходных сопротивлений электрод-деталь и исчезающе малого сопротивления в контакте между деталями. Сквозное проплавление деталей в этом случае, служит причиной появления трудноудаляемых выплесков металла ядра. Поэтому сборка конструкций из триметалла МХА производится в настоящее время преимущественно склепыванием.

Для получения сварных соединений триметаллов АХА и АХН, в электровакуумной промышленности широко используются монтажно-сварочные столы, оснащенные дозировщиками сварочного тока промышленной частоты. Однако в условиях массового производства, нагрев деталей током промышленной частоты не обеспечивает необходимое качество сварных соединений рассматриваемых триметаллов в случае исключения операций контроля прочности и зачистки выплесков.

Поскольку вопрос получения требуемых свойств точечных сварных соединений триметаллов типа МХА до последнего времени не был решен, а задача реализации качественных сварных соединений триметаллов типов АХА и АХН в условиях электровакуумного производства является актуальной, целью данной работы явилось повышение качества соединений деталей толщин 0,1–0,4 мм из триметаллов на основе алюминированного железа методом точечной контактной сварки применительно к конструкциям электровакуумных приборов. При этом основное внимание в работе уделялось проблеме получения качест-

венных сварных соединений материала МКА, являющегося перспективным заменителем более дорогостоящих электровакуумных материалов. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: разработать методику теоретических и экспериментальных исследований и экспериментальное оборудование ; исследовать влияние параметров импульсов сварочного тока на процесс формирования и свойства сварных соединений триметалла МКА а) - при сварке током промышленной частоты, б) - при сварке токами повышенных частот ; на основе проведенных исследований разработать процесс точечной контактной сварки триметаллов МКА, АКН, АКА и промышленное оборудование для его реализации, обеспечивающие получение соединений требуемого качества в условиях массового производства.

Глава 2 посвящена разработке математической модели процесса нагрева деталей из триметалла МКА, методике экспериментальных исследований, и описанию экспериментального сварочного и измерительного оборудования. Разработка математической модели процесса нагрева производилась с целью исследования влияния электрических параметров процесса на температурное поле в области сварочного промежутка и отыскания путей снижения температур приэлектродных зон при сварке. Математическая модель основывалась на совместном решении краевых электрической (уравнение Лапласа) и тепловой (уравнение теплопроводности) задач в геометрической системе электроды-детали. В процессе решения учитывались: нелинейности теплофизических характеристик сред ; контактные электрическое и тепловое сопротивления переходов электрод-деталь ; скрытые теплоты фазовых переходов ; явление теплопереноса при перемешивании жидкого металла. Аппроксимация основных уравнений и граничных условий производилась на неравномерной пространственной сетке по пятиточечной схеме. В сочетании с применением неявных методов интегрирования исходных уравнений, это позволило получить достаточно высокую точность вычислений при сравнительно небольшом их объеме.

Учет контактных электрического и теплового сопротивлений производился на основе экспериментально полученных кривых изменения сопротивлений в области сварочного промежутка путем соответствующего уменьшения табличных значений удельных электро- и теплопроводности слоя интерметаллида, причем степень этого уменьшения возрастала по мере приближения к поверхности электрода, т.е. по мере усиления стягивания линий тока на контактных микровысту-

пах интерметаллического слоя. Явление теплопереноса при перемешивании жидкого металла учитывалось путем увеличения удельной теплопроводности расплава.

Комплекс перечисленных мероприятий обеспечил погрешность расчетов температуры в области сварочного промежутка не более ±8%, что было установлено путем сравнения расчетных и экспериментальных температурных кривых. Измерение температуры осуществлялось микротермопарами с последующей частотной селекцией термо – э.д.с. от наводок.

В главе 2 приведено описание разработанных экспериментальных дозировщиков сварочного тока промышленной и повышенной частот. Управляемый источник тока повышенной частоты позволял исследовать процессы сварки в диапазоне частот сварочных импульсов 400-1600 Гц и их амплитуд 100-3600 А, при стабилизации любого заданного закона изменения амплитуды импульсов тока, напряжения между электродами и комбинированном режиме работы.

С целью измерения быстроизменяющихся омических сопротивлений в области сварочного промежутка, был разработан способ и его аппаратурная реализация, основанные на интегрировании величины напряжения между измерительными точками, периодически прерываемом с частотой, пропорциональной сварочному току. Полученная погрешность измерений составила ±4% в восьмикратном диапазоне изменения исследуемого сопротивления.

Методика оценки качества соединений предусматривала механические испытания сварных точек разрушающим срезывающим нагружением. Контроль появления выплесков осуществлялся визуально в процессе сварки, а также путем исследования под микроскопом зон контактов электрод-деталь. Соединение считалось качественным, если, при обеспечении требуемой прочности, имело место полное отсутствие различного рода выплесков. Вибростойкость соединений оценивалась при проведении натурных испытаний образцов приборов в условиях, определяемых соответствующими отраслевыми нормалями.

В главе 3 представлены результаты исследования процесса многоимпульсной сварки триметалла МЖА 0,3+0,3 мм токами промышленной и повышенной частот. Целью исследования являлось отыскание параметров кривой сварочного тока, обеспечивающих исключение выплесков интерметаллида и металла ядра при заданной прочности сварных соединений на срез $P_p > 30$ кго.

Предварительный литературный анализ возможных форм тока, применяемых при сварке триметаллов типов АЖА и АЖН на промышленной частоте, указал на предпочтительность использования непрерывной кривой тока с плавным нарастанием амплитуды первых 1-2 полупериодов. Поэтому оптимизация процесса сварки материала МЖА так же производилась в рамках непрерывной кривой тока промышленной частоты. Для каждого фиксированного числа полупериодов сварочного тока, амплитуды этих полупериодов выбирались с помощью симплексного метода планирования экстремальных экспериментов по критерию наименьшего процента соединений с выплеском металла ядра. Усилие сжатия и диаметр рабочей поверхности сварочных электродов поддерживались неизменными.

При исследовании процесса сварки 1-6 полупериодами было установлено, что нагрев током промышленной частоты не удовлетворяет требованию безвыплесковой сварки триметалла МЖА. Наименьший процент соединений с выплеском интерметаллида и металла ядра составил соответственно 86% и 48% при сварке 4 полупериодами тока с плавным нарастанием амплитуды первых двух импульсов. Исследование процесса нагрева деталей на математической модели показало, что выплески интерметаллида и металла ядра возникают вследствие перегревов приэлектродных зон до температур 1500°С и выше, служащих причиной сквозного проплавления деталей. В условиях определенной скорости теплоотвода в электроды, эти перегревы были вызваны значительной величиной пульсаций температуры, обусловленной недопустимо большой длительностью как периодов интенсивного тепловыделения при действии отдельных импульсов сварочного тока, так и периодов охлаждения при переходе тока через ноль.

Дальнейшие исследования показали, что мерой, позволяющей снизить величину перегревов приэлектродных зон, является применение импульсов тока меньшей длительности при одновременном сокращении пауз или квазипауз между ними, т.е. использование сварочного тока повышенных частот. Исследования проводились при отсутствии пауз между отдельными импульсами сварочного тока. При этом обеспечивалось плавное нарастание амплитуды импульсов по экспоненциальному закону на начальной стадии процесса и стабилизация этой амплитуды на заключительном этапе сварки. Было установлено, что в случае неизменной средней прочности соединений 35 кгс, существует не зависящее от частоты сочетание длительности нагре-

ва 35 мс, максимальной амплитуды импульсов тока 2,6I КА и постоянной времени нарастания этой амплитуды 6,5 мс, обеспечивающее наибольшее снижение уровня максимальных температур приэлектродных зон. При этом для частот сварочного тока 400 Гц и выше не наблюдалось сквозного проплавления деталей, что позволило устранить выплеск металла ядра. Исключение выплесков интерметаллида было достигнуто для частот сварочного тока превышающих 600 Гц.

Исследование процесса нагрева деталей на математической модели показало, что сварка током частоты 600 Гц, в сравнении с нагревом током промышленной частоты, обеспечивает снижение максимальных температур приэлектродных зон деталей до величины не более II00^{0}С, исключающей плавление интерметаллического покрытия и его выплеск. Вследствие использования режима оптимальной жесткости, наблюдалось уменьшение на I50-200^{0}С и уровней средних температур этих областей. Степень проплавления деталей составила 72% против 96% при сварке на частоте 50 Гц.

С целью дальнейшего снижения температур приэлектродных зон, при помощи разработанной математической модели процесса нагрева производилось исследование влияния частоты сварочного тока на температурное поле деталей. При этом, вместо экспериментальных кривых омических сопротивлений в области сварочного промежутка, в модели использовалась зависимость сопротивления единицы площади перехода электрод-деталь от температуры в контактном слое, полученная расчетно-экспериментальным путем. Было установлено, что при постоянном удельном давлении сварочных электродов и учете температурного гистерезиса и вентильных свойств контакта интерметаллид-электрод, эта зависимость описывается с точностью ±4% одной функцией независимо от частоты и скважности сварочных импульсов. Использование рассматриваемой зависимости позволило устранить составляющую погрешности модели, связанную с нестабильностью самого сварочного процесса, и исследовать динамику нагрева независимо от возможностей существующего экспериментального оборудования.

В результате расчетов было установлено, что повышение частоты сварочного тока от 400 до 3200 Гц, при сохранении неизменным закона нарастания температуры в центре сварочного промежутка, обеспечивает асимптотическое снижение максимальных значений температур приэлектродных зон до 25% на начальной стадии сварки. При чем это снижение является следствием уменьшения величины пульса-

ций температур, так как уровень средних, за период действия тока, температур сохраняется практически неизменным. Полученные результаты свидетельствуют, что использование частот 1600-3200 Гц позволяет уменьшить вероятность возникновения выплеска интерметаллида в случае отклонения параметров сварочного процесса от своих оптимальных значений.

Исследование влияния скважности сварочных импульсов на температуру приэлектродных зон показало, что при неизменных частоте тока и прочности соединений, увеличение пауз между отдельными импульсами тока приводит к появлению выплекса интерметаллида вследствие роста импульсных перегревов приэлектродных зон. Это указывает на необходимость использования непрерывной кривой тока повышенной частоты при сварке рассматриваемых триметаллов.

Глава 4 посвящена разработке способа управления процессом сварки триметалла МНА 0,3+0,3 мм током повышенной частоты, позволяющего исключить различного рода выплески и стабилизировать прочность соединений в условиях колебаний усилия сжатия сварочных электродов $P_э$, диаметра их рабочих поверхностей $d_э$, толщины интерметаллического покрытия $h_и$. Необходимость данного исследования была вызвана тем, что соединения триметаллов на основе алюминированного железа обладают повышенным разбросом прочности и склонностью к образованию выплесков при сварке. Последнее затрудняет обеспечение запаса прочности соединений для компенсации нестабильности этой прочности в условиях массового производства.

Результаты исследований, приведенные в главе 3, свидетельствуют о перспективности программирования закона нарастания амплитуды импульсов сварочного тока повышенной частоты для сварки рассматриваемого триметалла. В данной главе исследовалась эффективность этого способа управления процессом сварки по отработке перечисленных выше возмущений. Выбор параметров кривой сварочного тока производился исходя из требований обеспечения минимальной дисперсии прочности соединений σ^2_P при колебаниях толщины интерметаллического покрытия в пределах 24-36 мкм. При этом значения средней прочности соединений $\bar{P}_P$ = 35 кгс, усилия сжатия $P_э$ = 7 кгс и диаметра рабочих поверхностей электродов $d_э$ = 1,75 мм поддерживались неизменными. Было установлено, что наименьшая дисперсия прочности σ^2_P = 2,2 кгс^2 достигается для

режима сварки, найденного в главе 3, характеризующегося минимальной величиной импульсных перегревов приэлектродных зон и полным отсутствием различного рода выплесков. При этом большим значениям толщины $h_и$, т.е. большим значениям контактных сопротивлений электрод-деталь, соответствовала большая прочность соединений. В то же время, рассматриваемый способ управления процессом не обеспечивал достаточной стабильности средней прочности соединений $\bar{P}_р$ в условиях колебаний величин $P_э$ и $d_э$. Изменения величины $\bar{P}_р$ составили 42-28 кгс и 38-32 кгс в диапазонах вариации параметров $P_э$ и $d_э$ соответственно равных 3-11 кгс и 1,5-2,0 мм.

С целью достижения лучших результатов по отработке изменений усилия сжатия и диаметра рабочей поверхности сварочных электродов в работе производилось исследование программирования амплитуды импульсов напряжения между сварочными электродами. Анализ осциллограмм напряжения между электродами, полученных при программировании сварочного тока, показал, что уменьшение величины контактных сопротивлений электрод-деталь, необходимое для дальнейшего формирования литого ядра без сквозного проплавления, достигается при напряжении между электродами большем, чем то, которое необходимо для последующей сварки. Кроме того, уровень напряжения, обеспечивающий снижение этих сопротивлений, существенно зависит от величин $P_э$, $d_э$ и $h_и$. Поэтому, при программировании напряжения между сварочными электродами, на начальной стадии процесса обеспечивалось плавное нарастающее до величины 2,4 В напряжение, достаточное для снижения контактных сопротивлений в диапазоне изменения параметров $P_э$ = 3-11 кгс, $d_э$ = = 1,5-2,0 мм, $h_и$ = 24-36 мкм. На заключительном этапе сварки амплитуда импульсов напряжения была выбрана равной 2,1 В, что обеспечило прочность соединений $P_р$ = 35 кгс при $P_э$ = 7 кгс, $d_э$ = 1,75 мм, $h_и$ = 30 мкм.

В результате проведенных исследований было установлено, что изменение параметра $h_и$ в пределах 24-36 мкм обуславливает дисперсию прочности $\sigma_р^2$ = 4,2 кгс^2. При этом, в отличие от программирования сварочного тока, большим значениям толщины интерметаллического покрытия соответствовала меньшая прочность соединений. В то же время, при вариации значений $P_э$ и $d_э$ в рассмотренных выше пределах, данный способ управления процессом

обеспечил существенно меньшее, чем в случае программирования сварочного тока, изменение средней прочности соединений $\bar{P}_p$, составившее не более ±2 кгс. Наряду с этим, при программировании напряжения между электродами, на начальной стадии процесса сварки отмечалось появление выплесков интерметаллида. Это явилось следствием стабилизации независящего от величин $P_э$, $d_э$, $h_и$ закона изменения напряжения, обеспечивающего гарантированное снижение контактных сопротивлений электрод-деталь.

Для ликвидации недостатков двух рассмотренных выше способов управления процессом сварки триметалла МЖА был разработан комбинированный способ ведения процесса. На начальной стадии сварки, безвыплесковое снижение контактных сопротивлений электрод-деталь осуществляось при помощи программирования закона нарастания амплитуды импульсов сварочного тока, а уровень напряжения, обеспечивающего это снижение, менялся в зависимости от действия различных возмущающих факторов. К моменту окончания уменьшения контактных сопротивлений до определенной величины, при достижении напряжением между сварочными электродами уровня, необходимого для стабилизации заданных размеров литого ядра, осуществлялся переход управления процессом на стабилизацию амплитуды импульсов этого напряжения. При этом длительность стадии стабилизации напряжения поддерживалась постоянной, тогда как общее время сварки менялось при колебаниях толщины интерметаллического слоя, усилия сжатия сварочных электродов и диаметра их рабочих поверхностей.

Для реализации разработанного способа управления процессом сварки, в экспериментальном дозировщике сварочного тока повышенной частоты была предусмотрена система управления, автоматически выполнявшая изложенную последовательность операций. Выбор электрических параметров процесса сварки триметалла МЖА 0,3+0,3 мм производился по критерию наименьшего отклонения средней прочности соединений при изменении усилия сжатия сварочных электродов. Было установлено, что при колебаниях величин $P_э$ и $d_э$ в пределах 3-11 кгс и 1,5-1,75 мм соответственно, комбинированный способ управления процессом сварки обеспечивает стабильность средней прочности соединений не хуже ±2,5 кгс, что соответствует результатам, полученным при программировании сварочного напряжения. Кроме того, дисперсия этой прочности, обус-

ловленная колебаниями толщины интерметаллического слоя $h_и$ уменьшилась до значений $\sigma_р^{\Sigma} = 1{,}7$ кгс^2. Это объясняется противоположным влиянием величины $h_и$ на прочность в случае программирования сварочного тока и напряжения между сварочными электродами. Во всем диапазоне изменения параметров $P_э$, $d_э$, $h_и$ не отмечалось выплесков интерметаллида и металла ядра.

Проверка эффективности разработанного способа управления процессом, применительно к сварке широкой номенклатуры триметаллов типов АЖА и АЖН толщин 0,1–0,4 мм показала, что в сравнении с программированием сварочного тока, комбинированный способ управления обеспечивает существенное улучшение стабильности прочности соединений при возмущениях по параметрам $P_э$, $d_э$, $h_и$. Так например, при сварке триметаллов АЖН 0,4+0,4 мм и АЖА 0,3+0,3 мм, вариация величин $P_э$ и $d_э$ в диапазонах 3–12 кгс и 1,5–2,0 мм приводила к изменению средней прочности соединений в пределах 44–40 кгс против 49–21 кгс и 40–35 кгс против 42–24 кгс соответственно. Дисперсия прочности соединений этих материалов уменьшилась соответственно до 3,2 кгс^2 против 5,8 кгс^2 и 4,4 кгс^2 против 6,2 кгс^2. Во всех случаях имело место полное отсутствие различного рода выплесков.

Глава 5 посвящена разработке источника питания для точечной контактной сварки триметаллов на основе алюминированного железа током повышенной частоты и внедрению результатов работы в производство. Силовая часть источника была выполнена на базе параллельного инвертора с ключевым устройством в цепи постоянного тока (см. рис. 1а). Это позволило эффективно управлять амплитудой импульсов сварочного тока или напряжения между сварочными электродами путем принудительного выключения тиристоров инвертора в момент достижения одной из рассматриваемых величин заданного уровня (см. рис. 1б, момент t_1). В данной главе была поставлена и решалась задача оптимизации и расчета преобразователя частоты именно такого типа, с целью обеспечения необходимой величины сварного тока $I_{св}$ на заданных частоте F и сопротивления нагрузки $R_н$.

Анализ системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы изменения тока $i_1(t)$ и напряжения $u_c(t)$ первичной обмотки сварочного трансформатора, позволил применить для ее решения метод, основанный на использовании приближенных

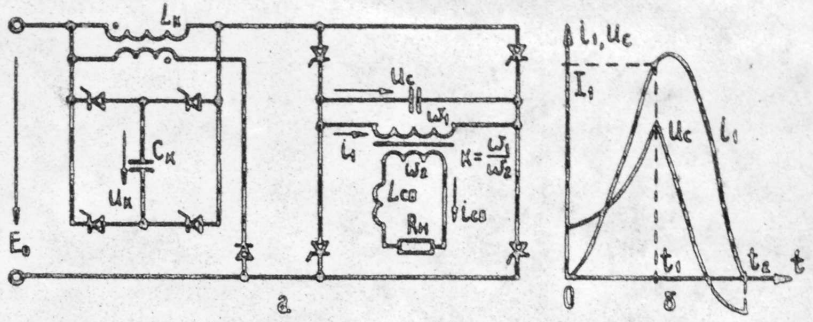


Рис. 5.I. а) Электрическая принципиальная схема силовой части преобразователя частоты. б) временные диаграммы одного полупериода тока напряжения первичной обмотки сварочного трансформатора

выражений для корней характеристических уравнений. Это существенно упростило задачи анализа и обеспечило точность последующих расчетов не хуже $\pm 4\%$. Решение рассматриваемой системы уравнений производилось при учете условия установившегося режима $U_c(0) = -U_c(t_2)$ и неравенства $U_c(0) \leq E_0$, определяющего область устойчивой работы преобразователя. При этом было установлено, что величина амплитуды импульсов тока $i_1(t_1) = I_1$, близкая к максимально достижимой при приемлемых стабилизирующих свойствах преобразователя, обеспечивается для значений характеристических параметров $m = L_к/K^2 L_{св} = 1$; $Q = (L_{св}/K^2 C R_н^2)^{1/2} = 1{,}5$; $U_c(0) = E_0$, и составляет $I_1 = 1{,}3\, E_0/K^2 R_н$.

Анализ системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы изменения величин $i_1(t)$, $U_c(t)$, $U_к(t)$ от момента срабатывания ключевого устройства t_1 до момента включения очередной пары тиристоров инвертора t_2, позволил установить необходимые условия надежного выключения силовых вентилей инвертора. Эти условия были получены в виде зависимостей отношений $\gamma = U_к(t_1)/E_0$ и $\beta = C_к/C$ от обобщенного параметра $z = t_в F$ (здесь $t_в$ – время восстановления вентильной прочности тиристоров в прямом направлении). Дополнительным условием определения являлось требование минимальных перегрузок тиристоров по напряжению. Использование полученных аналитических зависимостей позволило рассчитать предельную рабочую частоту преоб-

разователя $F_п$ как функцию параметров $I_{св} = i_{св}(t_и)$, $R_н$, $t_в$ в классе силовых тиристоров. При этом было установлено, что рост частоты сварочного тока ограничивается возникновением перегрузок тиристоров инвертора по напряжению. Для вентилей типа ТЧ-I25-9 кл. было получено значение $F_п$ = 3 КГц при $I_{св}$ = 3-4 КА и $R_н$ = I,5-2 мОм, что обеспечивает сварку всех рассмотренных в главе 4 типов триметаллов толщин до 0,4 мм.

Комплекс перечисленных мероприятий обеспечил аналитическую базу для разработки инженерной методики расчета преобразователя, оптимизированного по критерию минимальных перегрузок тиристоров инвертора по напряжению при заданных: максимальной величине амплитуды импульсов сварочного тока $I_{св}$, частоте сварочного тока F и сопротивлении нагрузки $R_н$. В расчетах учитывались соответствующие частоте F максимально допустимые амплитуды импульсов тока $I_{тм}$, напряжения $U_{тм}$ силовых тиристоров и время восстановления их вентильной прочности $t_в$. При этом были получены следующие соотношения, определяющие параметры основных элементов силовой части:

$$L_{св} = 0{,}135\,R_н/F\ ;\ K = 1{,}38\,I_{св}/I_{тм}\ ;\ E_в = 1{,}69\,I_{св}^2 R_н/I_{тм}\ ;$$
$$L_к = 0{,}257\,I_{св}^2 R_н/I_{тм}^2 F\ ;\ C = 3{,}16\cdot 10^{-2}\,I_{тм}^2/F\,I_{св}^2 R_н.$$

Экспериментальная проверка показала, что полученные соотношения обеспечивают точность расчета преобразователя не хуже ±I0%.

Результаты проведенных исследований были использованы при разработке промышленного образца универсального источника сварочного тока повышенной частоты. Источник обеспечивал реализацию разработанного способа управления процессом сварки триметаллов на основе алюминированного железа толщин 0,I-0,4 мм при амплитуде импульсов сварочного тока до 3,2 КА и частоте до I,5 КГц. В системе управления работой силовой части была предусмотрена возможность сварки широкой номенклатуры других материалов электровакуумного производства в режимах стабилизации сварочного тока или напряжения между сварочными электродами.

Рассмотренный дозировщик сварочного тока использован в составе универсального монтажно-сварочного стола типа И4.020.0093, разрабатываемого в настоящее время. Ожидаемый экономический эффект от внедрения единицы оборудования составляет не менее 20 тыс. рублей.

ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

I. На основе анализа проблемы точечной контактной сварки триметаллов типа алюминированного железа показано, что появление выплесков и колебание прочностных показателей соединений обусловлены значительными контактными сопротивлениями переходов электрод-интерметаллическое покрытие деталей, являющимися нестабильными источниками интенсивного тепловыделения при сварке.

2. Экспериментальными и теоретическими исследованиями по многополупериодной сварке триметалла МЖА 0,3+0,3 мм током промышленной частоты установлено, что причиной сквозного проплавления деталей и образования выплесков интерметаллида и металла ядра являются импульсные перегревы приэлектродных зон, достигающие I400+I700 °С и возникающие вследствие недопустимо больших длительностей циклов нагрева деталей при действии отдельных полупериодов сварочного тока.

3. Экспериментальными и расчетными методами обосновано, что исключение сквозного проплавления деталей из триметалла МЖА 0,3+0,3 мм и устранение выплесков металла ядра достигаются путем уменьшения длительностей периодов нагрева и охлаждения деталей при повышении частоты синусоидального сварочного тока до 400 Гц и выше. При этом, увеличение частоты от 400 до 3200 Гц обеспечивает снижение максимальных значений температуры приэлектродных зон до уровня не более II00 °С за счет уменьшения величины пульсаций этой температуры при сохранении ее средних значений, что позволяет исключить выплески интерметаллида для частот, превышающих 600 Гц.

4. Экспериментальным путем установлено, что исключение выплесков и стабилизация прочности соединений триметаллов типа алюминированного железа в условиях изменения: усилия сжатия сварочных электродов, диаметра их рабочих поверхностей, толщины и степени шероховатости интерметаллического покрытия, достигаются при программировании нарастания амплитуды импульсов тока повышенных частот на начальной стадии процесса нагрева, в сочетании со стабилизацией амплитуды импульсов напряжения между сварочными электродами на заключительном этапе сварки и длительности этого этапа.

5. Теоретически и экспериментально показано, что введение контактных электрического и теплового сопротивлений переходов электрод-деталь в математическую модель процесса нагрева может

осуществляться путем уменьшения удельных электро- и теплопроводности менее электропроводного материала деталей в области стягивания линий электрического тока. При этом, степень изменения теплофизических параметров определяется с помощью сравнения экспериментальных и расчетных временных зависимостей омических сопротивлений в области сварочного промежутка с учетом увеличения стягивания линий тока по мере приближения к поверхности контакта.

6. Анализ дифференциальных уравнений, описывающих электрические процессы в силовой части источника сварочного тока повышенной частоты, проведенный с использованием приближенных выражений корней характеристических уравнений, позволил обеспечить надежность работы преобразователя и разработать инженерную методику расчета источника с необходимыми свойствами, обеспечивающую точность расчетов не хуже ±10%.

7. Внедрение результатов работы в производство ЭВП позволяет заменить операцию склепывания анодов из материала МКА на более дешевую и производительную операцию сварки. Замена существующей технологии точечной контактной сварки триметаллов АКА и АКИ на разработанную, позволяет устранить выплески и стабилизировать прочность соединений.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Матвеев В.И., Белозеров В.И., Калимулин В.А., Кольвах В.Ф., Круглов Г.Н. Устройство для контактной микросварки. Авт. свид. № 616087, Бюлл. изобрет. № 27, 1978.

2. Матвеев В.И., Кольвах В.Ф., Круглов Г.Е. Способ контактной точечной сварки. Авт. свид. № 623682, Бюлл. изобрет. № 34, 1978.

3. Матвеев В.И., Кольвах В.Ф., Ломов И.А. Расчет управляемого тиристорного источника питания для контактной микросварки. "Автоматическая сварка", 1979, № 4, с. 50-52.