

М237946

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

СТРОЕВ Владимир Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА
КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ Т-ОБРАЗНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ

(05.04.05 — Технология и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
доцент, к. т. н. Каганов Н. Л.

Официальные оппоненты:

Ведущее предприятие — Первый Московский завод радио-
деталей.

Автореферат разослан « » 1974 г.

Защита диссертации состоится « » 1974 г.
на заседании Совета
Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного
Знамени высшего технического училища им. Н. Э. Баумана
по адресу: Москва, 107005

Ваши отзывы в 2-х
просьба высылать по

С диссертацией мо
лица.

Ученый секретарь (

М237916

В решении XXIV съезда КПСС указывается на необходимость резкого увеличения объема использования радиоэлектронной аппаратуры. В выполнении этой задачи существенная роль отводится миниатюризации элементов электронных схем. Одним из примеров является разработка малогабаритных резисторов большой (25-50вт) мощности.

Важной операцией при производстве малогабаритных мощных резисторов является соединение вывода с колпачком Т-образного контактного узла. Применяемые в настоящее время методы соединения: пайка, клепка, аргонодуговая сварка, не удовлетворяют требованиям производства. В связи с этим значительный интерес представляло исследование возможности использования для получения Т-образных соединений контактной сварки как одного из наиболее перспективных способов.

Исследованию процесса, разработке оборудования и технологии контактной конденсаторной сварки Т-образных соединений малогабаритных резисторов большой мощности и посвящена данная работа.

ГЛАВА I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ИХ РЕШЕНИЮ.

Вопросам контактной сварки Т-образных соединений посвящено большое количество исследований (В.Э. Моравский, Д.М. Каленко, Р.Б. Рудзит, П.И. Евтифеев, B. Neville Cox, J. Watts и др.). Установленные в этих работах закономерности, представляющие определенный интерес, служили отправными моментами при проведении предварительных экспериментов и постановке задач данного исследования.

Конструктивной особенностью рассматриваемых Т-образных контактных узлов является то, что для рассеивания повышенной мощности вывод изготавливается из медного стрежня большого диаметра 2 мм, а колпачок - из никеля или никелированного томпака имеет малую толщину 0,3-0,35 мм. Контактные узлы, как и изделие в целом, эксплуатируются в тяжелых климатических условиях, при вибрационных и ударных нагрузках. Причем через контактные узлы рассеивается до 40% номинальной мощности. Это предл



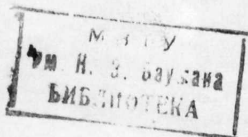
M234916

влет высокие требования к качеству Т-образного соединения вывода с колпачком.

Анализ технологических особенностей и эксплуатационных свойств различных способов контактной сварки, применяемых в производстве резисторов малой мощности типа ВС, МЛТ и др., позволил выбрать за базовый способ—конденсаторную сварку. Как показали предварительные эксперименты, основная трудность конденсаторной сварки контактных узлов заключается в том, что при нагреве максимальное теплообразование происходит в детали с большим электросопротивлением. Это приводит к прожогу или чрезмерной деформации колпачка при осадке. Условием преодоления указанной трудности является повышение роли сопротивления сварочного контакта, способствующего смещению зоны максимального нагрева к поверхности сопряжения деталей. Анализ литературных данных (В.К.Лебедев, Р.Б.Рудзит и др.) показал, что наиболее эффективным технологическим приемом повышения роли контактного сопротивления является изменение сварочного тока и усилия сжатия по благоприятной для образования соединения программе.

Для определения требуемой геометрии импульса тока был использован расчетно—экспериментальный метод, разработанный Н.Л.Кигановым. В расчетную схему заложено условие образования на свариваемых поверхностях деталей расплавленного слоя металла. Форма кривой тока найдена геометрическим построением эквивалентной трапеции. С целью снижения скорости нарастания тока и уменьшения вероятности выплесков трапеция была дополнена эквивалентным треугольником. Выявленные расчетным путем параметры формы кривой сварочного тока, служили исходными данными для разработки конденсаторного дозатора энергии экспериментальной установки.

Вопросы определения расчетным путем программы изменения усилия сжатия являются довольно сложными и пока решаются только на основе практического опыта. Исследования в этом направлении для конденсаторной сварки малых толщин и сечений проводились очень мало (Ю.М.Кашурников), что отчасти можно объяснить трудностями осуществления контролируемых и точно воспроизводимых циклов сжатия при кратковременном нагреве. В связи



с этим, одной из основных задач данной работы являлось экспериментальное определение оптимальной программы усилия сжатия. Предпосылки к выбору закона изменения усилия сжатия заключались в следующем:

1. Термический к.п.д. нагрева повышается, если минимально возможное усилие сжатия обеспечивается при значении тока близком к амплитудному.

2. Образование расплавленного слоя в контакте при сварке открытых соединений всегда сопровождается снижением усилия сжатия до нулевого значения, о чем свидетельствуют работы Ю.М.Кашурникова, Э.В.Бумбиериса и др.

3. При плавлении снижается устойчивость процесса сварки и появляется опасность конечного выплеска с дугообразованием.

Таким образом, с одной стороны, механизм сжатия должен быть достаточно инерционным, чтобы обеспечить плавление, с другой – малоинерционным, чтобы избежать взрыва расплавленного металла и произвести высокоскоростную осадку деталей. Эти два противоречивых требования были частично реализованы обычными способами путем подбора начального статического усилия сжатия, жесткости рабочей пружины привода и массы подвижного электрода.

Методика оценки качества сварных соединений

Важной задачей исследования являлось изыскание метода объективной оценки качества соединений. Такой метод должен прежде всего удовлетворять двум основным требованиям:

1) характеризовать работоспособность соединений в условиях эксплуатации;

2) быть достаточно чувствительным к небольшим изменениям параметров режима сварки.

Предварительные эксперименты показали, что существующие методы оценки качества Т-образных соединений путем перегиба и отрыва вывода не удовлетворяют указанным требованиям. В связи с этим был разработан способ испытания соединений на малоцикловую усталость по схеме знакопеременного консольного изгиба вывода при непрерывном вращении сварного узла. Было установлено, что результаты испытания на выносливость зависят от параметров режима и условий сварки. При этом главными факторами, участвующими в механизме разрушения соединения, являются кон-

центраторы напряжений, обусловленные структурой металла и формой соединения, характеризуемой углом сопряжения вывода и колпачка по периметру контакта. Выносливость сварных соединений оценивали по количеству циклов нагружения N до разрушения контактного узла.

Исследование влияния формы торца вывода на процесс и качество сварки

При Т-образной сварке обычно торец вывода предварительно формируют по специальному профилю. Поскольку, изменяя форму торца вывода можно воздействовать на характер нагрева и деформирования металла в зоне сварки, в одну из задач работы входило исследование влияние этого фактора на качество соединения. В опытах использовали выводы со сферическим, призматическим (типа "заостренного зубила") и плоским торцем. Для выявления взаимосвязи характера протекания процесса сварки и качества соединения осциллографировали геометрию импульса тока, падение напряжения и усилие сжатия в свариваемом контакте, перемещение электрода. Измерение усилия в контакте и перемещения электрода производили с помощью пьезоэлектрической аппаратуры.

На оптимальном для каждой формы торца режиме была сварена серия контактных узлов и по результатам испытания выборки в 50 образцов построены полигоны распределения выносливости. Оказалось, что наибольшее средне-статистическое значение выносливости $N = 87$ имеют соединения с плоским торцем вывода. При сферическом и призматическом торце вывода соединения выдерживали в среднем соответственно 17 и 45 циклов до разрушения. Металлографический анализ соединений с заостренным торцем вывода выявил узкую центральную зону высокой температуры с глубоким проплавлением колпачка и широкую зону низкотемпературного контактирования деталей по периферийным участкам. При плоском торце область высоких температур более равномерно распределена в плоскости сопряжения деталей, подрезы отсутствуют и соединение имеет более благоприятную форму. При анализе осциллограмм было выявлено, что независимо от формы торца вывода, процесс сварки протекает в три стадии: подогрев, плавление и осадка. При заостренных торцах каждая стадия протекает более короткое время, в связи с повышенной локализацией нагрева и облегченными условия-

ми деформирования металла в зоне сварки.

На основе проведенных исследований было установлено, что для конденсаторной сварки контактных узлов необходимо использовать выводы с плоским торцом.

Для оценки стабильности качества соединений по результатам испытания 200 образцов была построена гистограмма выносливости и установлена нормальность ее распределения. Выяснилось, что 30% контактных узлов имеют неудовлетворительное качество сварки. При анализе соответствующих осциллограмм было обнаружено, что качество соединения находится в прямой зависимости от длительности стадии плавления $t_{пл}$. В частности, при $t_{пл} = 2,6-2,9$ мсек: $N = 50-70$ циклов, при $t_{пл} = 3,3-3,5$ мсек: $N = 120-150$ циклов.

Наиболее вероятной причиной нестабильности протекания процесса сварки является разброс переходного сопротивления выводов-колпачков, обусловленный случайным характером начального контактирования деталей. Известно, что одним из средств уменьшения влияния возмущающих факторов на качество соединения является сварка на режимах с повышенным значением сварочного тока. При сварке на таких режимах длительность стадии плавления увеличивается до 3,5-3,6 мсек. Однако при этом процесс сварки сопровождается выплесками, а иногда заканчивается взрывом расплавленного металла и прохогом колпачка. Осциллограммы процесса характеризуются обрывом кривых тока и падения напряжения. Кривая усилия сжатия при нулевом значении имеет горизонтальный участок, свидетельствующий о наличии зазора между деталями после выброса жидкого металла и разрыва электрической цепи.

Предпосылки к рациональному построению процесса сварки

На всех осциллограммах процесса сварки при непроваре, качественном соединении и прохоге кривая изменения усилия сжатия во время стадии плавления имеет два интервала времени. В течение первого изменения усилия носит колебательный характер, что связано с чередованием процессов плавления и смятия микро- и макровыступов в контакте. В этом интервале времени длительностью 2,0-2,5 мсек деформационные процессы, вызванные нагревом, приводят к снижению его интенсивности, т.е. происходит частичное саморегулирование интенсивности нагрева. Благодаря проявлению этого эффекта, процесс плавления в первом интер-

вале времени протекает устойчиво.

Во втором интервале времени длительностью $t = 1$ мсек усилие сжатия в контакте резко снижается, что связано с объединением отдельных очагов плавления. При образовании в контакте жидкого слоя металла усилие падает до нуля. Если в этот момент времени скорость сближения деталей меньше скорости увеличения объема расплавленного металла, последний не успевает выдавливаться, перегревается и при взрыве выбрасывается из стыка. Устойчивость процесса плавления нарушается. В связи с этим, было сделано предположение о том, что для повышения устойчивости стадии плавления и увеличения ее длительности необходимо в момент интенсивного спада усилия сжатия резко увеличить скорость сближения деталей. Реализовать программу сближения деталей с переменной скоростью можно с помощью механизма сжатия с регулируемой динамикой.

Исходя из цели работы и результатов предварительных исследований, необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать средства для реализации процесса сварки с программным изменением усилия сжатия.
2. Разработать технологию сварки контактных узлов различных типоразмеров.
3. Уточнить механизм образования соединения.
4. Исследовать возможность неразрушающего контроля качества соединений.
5. Довести результаты исследования до производственного применения.

ГЛАВА II. РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ СВАРКИ С ПРОГРАММНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ УСИЛИЯ СЖАТИЯ

В результате анализа существующих схем механизмов сжатия с регулируемой динамикой было установлено, что применительно к сварке Т-образных соединений, наиболее целесообразным конструктивным решением является комбинированный привод сжатия. В таком приводе предварительное сжатие деталей и сближение их во время нагрева и плавления осуществляется цилиндрической пружиной, а резкое увеличение скорости перемещения электрода в заданный момент времени производится электродинамическим приводом (ЭДП), выгодно отличающимся по динамическим свойствам

от электромагнитной системы.

Электродинамическая система представляет собой две параллельные дисковые катушки, между которыми при прохождении тока возникает сила взаимодействия. Одна из катушек крепится жестко с основанием механизма сжатия, другая связана с подвижным электродом.

При расчете тока, достаточного для создания требуемого усилия взаимодействия катушек пользовались методикой, предложенной Л.А.Любимским и В.Я.Хазовым.

В качестве источника питания ЭДП использовали дозатор энергии, разряд конденсаторов которого на катушки электродинамического привода осуществляли через отдельный трансформатор типа сварочного. Согласование сварочного тока и электродинамического усилия производили с помощью электронного блока синхронизации.

Для выявления технологических возможностей ЭДП был разработан способ динамической тарировки электродинамического усилия. Исследование регулировочных характеристик ЭДП показало, что варьированием емкости и напряжения зарядки конденсаторов можно в широких пределах изменять амплитуду электродинамического усилия, скорость нарастания и время его действия.

ГЛАВА III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВАРКИ С ПРОГРАММНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ УСИЛИЯ СЖАТИЯ

Оптимизация процесса сварки методом математического планирования эксперимента

В настоящее время при оптимизации сварочных процессов успешно применяются методы математического планирования экспериментов. Об этом свидетельствуют результаты их использования в исследованиях Н.С.Кабанова, В.Г.Квачева, Н.В.Подола, О.Т.Касаткина и др., посвященных вопросам контактной сварки.

В связи с расширением технологических возможностей способа конденсаторной сварки с программным изменением усилия сжатия и увеличением количества факторов, влияющих на процесс и качество сварки, была сделана попытка оптимизировать процесс сварки с помощью одного из методов активного эксперимента, метода Бокса-Уилсона.

За параметр оптимизации приняли выносливость сварных соединений. Изучалось влияние на качество соединения следующих пяти факторов: напряжения зарядки конденсаторов сварочной цепи, $U_{св.} - x_1$; статического усилия сжатия, $P_{ст.} - x_2$; установочной длины вывода, $l_{уст.} - x_3$; напряжения зарядки конденсаторов цепи привода, $U_{д.} - x_4$; времени включения привода относительно начала протекания сварочного тока, $t_{д.} - x_5$.

Уровни и интервалы варьирования факторов выбирали на основе априорной информации, полученной в предыдущих исследованиях. Была составлена матрица планирования дробной реплики 2^{5-2} и реализовано 8 опытов при пяти параллельных в каждом. С целью исключения систематической ошибки экспериментов осуществляли рандомизацию опытов по таблице случайных чисел.

В результате расчетов с использованием статистических проверок воспроизводимости эксперимента, ошибки опыта и значимости коэффициентов регрессии были получены линейные модели и установлена их адекватность реальному процессу сварки.

Для сварки меди $\varnothing 2,0$ мм с никелем $\bar{y} = 0,35$ мм:

$$y = 103,6 + 25x_1 + 10,4x_2 + 12,9x_3 + 5,4x_4 + 20,5x_5$$

для сварки меди $\varnothing 2,0$ мм с томпаком $\bar{y} = 0,3$ мм:

$$y = 53,1 + 12,4x_1 - 18x_2 - 5,2x_4 + 13,7x_5$$

Физическая интерпретация полученных уравнений регрессии позволила целенаправленно изменять факторы в соответствии с величиной и знаком коэффициентов при постановке опытов "крутого восхождения" к оптимуму.

В результате планирования эксперимента были выявлены оптимальные режимы сварки, при которых сварные соединения меди с никелем выдерживали при испытании 280-300 циклов, меди с томпаком 190-210 циклов до разрушения. Это в 3-4 раза превышает выносливость соединений, сваренных существующим способом конденсаторной сварки.

Для оценки стабильности качества сварки по результатам испытания выборки в 200 образцов построили гистограммы распределения выносливости соединений. Проверка нормальности эмпирического распределения позволила установить, что технология сварки с программным изменением усилия сжатия обеспечивает 100% годность сварных соединений. Как показали осциллограммы процесса сварки, это достигнуто благодаря двум факторам:

1) увеличению длительности стадии плавления (медь-никель: 3,6-3,8 мсек, медь-томпак 4,2-4,5 мсек);

2) высокоскоростной осадки (400-440 мм/сек) с максимальным усилием, равным для меди с никелем - $2 P_{ст.}$, для меди с томпаком - $5 P_{ст.}$.

Интенсивная деформация медного вывода, нагретого до высокой температуры, обеспечивает формирование соединения с коэффициентом площади $K_{пл.} = 2-3$ и плавным сопряжением деталей по периметру контакта. Таким образом, проведенные исследования подтвердили ранее выдвинутые предпосылки к рациональному построению процесса сварки.

О механизме образования соединения

Наиболее ответственными за образование соединения высокого и стабильного качества являются стадии плавления и осадки. Для всех осциллограмм процесса сварки на оптимальном режиме характерно то, что усилие сжатия в контакте во время стадии плавления уменьшается до величины $0,6-0,7 P_{ст.}$. При этом зона максимальных температур по микрошлифам соединений находится в контакте.

Анализ осциллограмм процесса сварки опытов по планированию эксперимента и сопоставление их с микрошлифами соединений показали, что при уменьшении усилия сжатия в контакте ниже $0,6 P_{ст.}$ происходит расплавление глубинных слоев никелевого колпачка. При снижении усилия до нулевого значения область максимальных температур охватывает 70-80% толщины колпачка и появляется опасность его сквозного проплавления.

На основании этого был сделан вывод о том, что для повышения стабильности процесса сварки меди с никелем усилие сжатия в контакте во время стадии плавления должно быть не ниже $0,6 P_{ст.}$.

Аналогично выявлено, что при сварке меди с томпаком усилие в контакте может быть снижено до $0,3 P_{ст.}$.

При изучении внешнего вида разрушенных образцов было установлено, что соединение высокого качества образуется по трем концентрично расположенным зонам. В центральной зоне диаметром 1,5-2,0 мм сварка осуществляется путем взаимного расплавления материалов. В средней зоне шириной 0,3-0,4 мм соединение образуется при расплавлении только вывода.

В периферийной зоне шириной 0,4–0,5 мм сварка осуществляется без расплавления материалов. Имеются основания полагать (И.Я.Тарновский, Б.Д.Орлов, В.Н.Тимофеев), что такой характер образования соединения обусловлен неравномерностью распределения контактных напряжений во время осадки вывода, являющегося основным очагом деформации. Местоположение этих зон находится в соответствии со схемой распределения контактных касательных напряжений по трем зонам, названным Е.П.Унковым зонами зас-
тоя, торможения и скольжения. В средней зоне торможения и периферийной – скольжения при осадке действуют силы контактного трения, которые приводят к разрушению никелевого покрытия при сварке меди с никелированным томпаком. При сварке меди с никелем эти силы способствуют дополнительной механической активации свариваемой поверхности и повышению прочности соединения по периферии контакта.

Исследование возможности неразрушающего контроля качества соединений

По результатам статистической обработки данных исследования стабильности качества сварки была установлена достаточно тесная корреляционная связь между выносливостью соединений и величиной осадки деталей. Для соединений меди с никелем $\gamma = 0,82$, меди с томпаком $\gamma = 0,76$. Распределение точек корреляционного поля величины осадки и выносливости относительно теоретической линии регрессии характеризуется кривой, удовлетворяющей нормальному закону распределения. Это позволяет использовать для определения вероятного диапазона колебаний выносливости и осадки таблицу значений функции Лапласа.

ГЛАВА IV. ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе проведенных исследований создан полуавтомат конденсаторной сварки с программным изменением усилия сжатия и определены оптимальные режимы сварки контактных узлов нескольких типоразмеров. Заводские комплексные испытания показали 100% годность сварных соединений. В настоящее время разработанное оборудование и технология сварки используются в опытном производстве резисторов.

ВЫВОДЫ

1. Рациональным способом сварки Т-образных соединений материалов с резко различными теплофизическими свойствами и сечениями является способ конденсаторной сварки с программным изменением усилия сжатия.

2. Программирование усилия сжатия позволяет максимально повысить роль сопротивления сварочного контакта как источника теплоты и сместить зону расплавления к поверхности сопряжения свариваемых деталей.

3. Основными условиями образования высококачественного Т-образного соединения являются расплавление материалов в контакте и высокая скорость осадки деталей. При программном изменении усилия сжатия это обеспечивается за счет резкого изменения скорости сближения свариваемых деталей в момент образования расплавленного слоя металла в контакте.

4. Установлено, что в условиях кратковременного нагрева сближение свариваемых деталей с переменной скоростью может быть реализовано при импульсном приложении усилия сжатия. Для этого целесообразно использовать электродинамический привод с импульсным источником питания.

5. Установлена взаимосвязь между кинетикой формирования соединений и характером изменения усилия сжатия в контакте. Выявлено, что процесс конденсаторной сварки Т-образных соединений протекает в 3 стадии: подогрев, плавление и осадка.

6. Показана возможность и эффективность использования при оптимизации процесса сварки одного из методов математического планирования эксперимента, метода Бокса-Уилсона. Установлено, что при оптимальных параметрах режима способ конденсаторной сварки с программным изменением усилия сжатия, по сравнению с обычным, позволяет в 3-4 раза повысить выносливость сварных соединений.

7. Установлено, что высококачественное Т-образное соединение при конденсаторной сварке с программированием усилия сжатия образуется по трем концентрично расположенным зонам: центральной с взаимным расплавлением, средней с расплавлением только вывода, периферийной — без расплавления материалов. Местоположение зон образования соединения находится в соответствии со схемой распределения контактных напряжений, известной в теории обработки металлов давлением.

8. При выборе оптимальных параметров режима и условий сварки Т-образных соединений целесообразным методом оценки качества является испытание на выносливость по схеме знакопеременного изгиба при непрерывном вращении образца. О стабильности процесса и качества сварки на оптимальном режиме в условиях массового производства с достаточной степенью достоверности можно судить по величине осадки деталей.

9. Программное изменение усилия сжатия значительно расширяет технологические возможности способа конденсаторной сварки и открывает перспективы в решении ряда практических задач, выдвигаемых приборостроением.

10. Разработанные на основе проведенных исследований оборудование и технология сварки контактных узлов резисторов, доведены до производственного применения. Годовой экономический эффект от внедрения разработанного процесса сварки в производство резисторов в расчете на 100 тысяч изделий составляет 16,4 тыс. рублей.

Диссертация содержит 154 страницы, 48 рисунков и 18 таблиц. В списке использованной литературы приведено 97 наименований.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Каганов Н.Л., Строев В.И. Методика оценки качества Т-образных соединений. "Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции по сварке", Могилев, 1972.
2. Каганов Н.Л., Строев В.И. Исследование процесса конденсаторной сварки Т-образных соединений резисторов. "Известия вузов. Машиностроение", № 1, 1974.
3. Каганов Н.Л., Исаев А.И., Строев В.И. Установка для контактной конденсаторной сварки с программированием усилия сжатия. "Известия вузов. Машиностроение", № 2, 1974.

Материалы диссертации доложены на научных семинарах кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" ~~ИВТУ~~ им. Баумана.