

М 491625
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ СССР

Московский

ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана

На правах рукописи

МОРГУН АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ
КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ РАЗНОИМЕННЫХ МЕТАЛЛОВ УНИПОЛЯРНЫМ
ИМПУЛЬСОМ ТОКА НА БАЗЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССА

05.03.06 - Технологии и машины сварочного производства

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Москва

1990

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена
Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
Государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель – кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
ИСАЕВ А.П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ЧАКАЛЕВ А.А.

кандидат технических наук, доцент
АТАМАНОВ В.Н.

Ведущее предприятие – Калужский радиоламповый завод

Защита диссертации состоится "15" ноября 1990 г.
на заседании специализированного совета К053.15.03 в Московском
ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Государственном техническом университете
Москва, Б-5, 2-я Бауманская

заверенный печатью,

библиотеке МГТУ

ноября 1990 г.

В.И.ГИРШ

11491 685

кз. Подписано к печати
27.09.90
Бауманская, 5.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время в радиоэлектронной промышленности, в аппаратуре автоматики и связи широко применяются малогабаритные электромагнитные реле, использование которых создает большие возможности для автоматизации производственных процессов. Наиболее широкое применение получили нейтральные электромагнитные малогабаритные реле с одним или двумя переключающими контактами типа РЭС-47; РЭС-49; РЭС-54; РЭС-60. Реле — сложная пространственная конструкция, при изготовлении которой применяются, как правило, конденсаторную точечную и рельефную сварку. При этом используются такие материалы, как: нейзильбер (МНЦ 15-20), ковар (29НК), никель, бронза БрБА, нержавеющей сталь Х18Н10Т, электротехническая сталь (20864 и 20880).

Одной из основных проблем при сварке узлов реле является нестабильность взаимного проплавления разноименных металлов униполярным импульсом тока и, как следствие, низкая стабильность прочностных характеристик соединений. Существующие технологические приемы, применяемые при конденсаторной сварке деталей малых толщин (0,1...0,5 мм) и сечений из разноименных металлов, не позволяют существенно повысить качество сварки.

Наиболее рациональным путем совершенствования технологии является создание математической модели процесса и на анализе решения моделируемой электротепловой задачи формулировка требования к параметрам режимов сварки (направления, вида и формы импульса сварочного тока).

Цель работы. Целью работы является совершенствование технологии сварки разноименных металлов с резко различными теплофизическими и термоэлектрическими свойствами, обеспечивающей получение соединения со стабильным проплавлением деталей.

Методы исследования. Данная работа основана на применении численных методов, реализующих расчетные схемы, заложенные в математическую модель процесса. Для решения дифференциальных уравнений в частных производных с учетом определенных граничных условий, описывающих электротепловые процессы в межэлектродной зоне, применялся метод конечных разностей.

Основными методами экспериментальных исследований являлись: осциллографирование электрических параметров сварки; металлографический анализ; прочностные испытания на срез сваренных образцов.

I

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1491685

Моргун А.А. Повышение стабильности

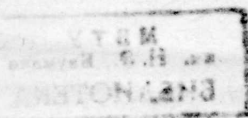
МВТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

Научная новизна. Математические расчеты и экспериментальные исследования динамики развития соединения позволили синтезировать форму импульса сварочного тока при контактной точечной сварке металлов с резкоразличными теплофизическими свойствами и выявить закономерности образования литого ядра. Развитие литого ядра происходит в три этапа: первый этап длится от момента включения тока до достижения температуры плавления в металле с более низкой теплопроводностью; второй этап сопровождается развитием зоны плавления до момента достижения ее плоскости стыке свариваемых деталей; на третьем этапе происходит переплавление плоскости контакта, сопровождающееся взаимным проплавлением деталей до завершения развития литого ядра.

В представленной математической модели, описывающей электро-тепловые процессы в межэлектродной зоне при сварке униполярным импульсом тока разноименных металлов, определены граничные условия для расчета с учетом специфики процесса и впервые предложены методы учета термоэлектрического эффекта Пельтье и динамики изменения контактных электрического и термического сопротивлений.

Практическая ценность. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая определить электрические и температурные поля, отрабатывать технологические приемы и оценивать воздействие их на глубину взаимного проплавления, например, влияние: диаметра контактной поверхности электрода и материала, из которого он изготовлен, на положение изотермы плавления в межэлектродной зоне; уровня контактных сопротивлений и эффекта Пельтье. Сформулированы требования к форме импульса сварочного тока, обеспечивающей взаимное проплавление деталей из металлов с резкоразличными теплофизическими свойствами. Разработанный пакет программ расчета параметров сварочного тока передан для освоения в ХПО "Радиореле".

Апробация работы. Основные положения работы доложены на межвузовской научно-технической конференции "Прогрессивные технологии и конструкции, механизация и автоматизация производственных процессов в машино- и приборостроении" (г.Калуга, 1987 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем" (г.Калуга, 1989 г.); на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МТУ им.Н.Э.Баумана (г.Москва, 1988 г.).



Объем работы. Диссертация состоит из четырех глав, содержит 169 страниц машинописного текста, 45 рисунков и 16 таблиц. В списке используемой литературы 90 наименований.

Глава I. В радиоэлектронной промышленности, в частности, при производстве миниатюрных реле, как правило, контактной точечной сваркой свариваются детали из разноименных металлов с резко различными теплофизическими свойствами. Так, например, необходимо сваривать такие полярные по свойствам материалы, как нейзильбер-электротехническая сталь, нержавеющая сталь - никель. Основная проблема, которую приходится решать при разработке технологии точечной сварки разноименных металлов, заключается в необходимости стабилизации глубины проплавления деталей. Эта проблема вытекает из того, что при сварке разноименных металлов стык свариваемых деталей не является наиболее нагретым местом на протяжении всего процесса и литое ядро располагается асимметрично относительно стыка свариваемых деталей и в условиях действия возмущающих факторов не удается получить стабильного взаимного проплавления деталей. Так, например, при сварке никеля с нержавеющей сталью Х18Н10Т толщиной 0,2 мм глубина проплавления в детали из никеля колеблется от 5 % до 30 % толщины, а прочность при испытании на срез - от 8 до 16 даН.

Известны способы и технологические приемы, с помощью которых можно регулировать положение литого ядра в соединении прокладками, размерами и материалами электродов, использованием жестких режимов и сваркой униполярным импульсом. Однако, большинство указанных приемов, кроме последнего, в случае сварки деталей из разноименных металлов малых толщин и сечений неэффективно, а порой и невозможно вследствие небольших габаритов изделий.

Базовым способом сварки разноименных металлов в радиоэлектронной промышленности является конденсаторная сварка. Это связано с тем, что данный способ дает возможность применять жесткие режимы со строго дозированной энергией и использовать сварочный импульс сложной формы.

При сварке униполярным импульсом тока разноименных металлов малых толщин и сечений возрастает роль не только контактного сопротивления, но и термоэлектрических эффектов.

В результате их положительного действия в ряде случаев удается сместить литое ядро в направлении, обеспечивающем взаимное

проплавление деталей.

В процессе разработки технологии сварки с целью формирования рационального температурного поля, которое позволяет получить взаимное проплавление деталей, возникает ряд трудностей.

Во-первых, затруднено или практически невозможно прямое измерение температуры из-за малости объема исследования.

Во-вторых, экспериментальный подбор формы импульса тока, направления и время его действия позволяет получить лишь частные решения для конкретных пар металлов и условий их сварки. Более рациональный путь видится в исследовании электротепловой обстановки в межэлектронной зоне на базе математического моделирования процесса сварки.

Исследованием электрических и температурных полей при контактной сварке занимались Гельман А.С., Балковец Д.С., известны работы школы МАТИ, а также группы контактной сварки MBTU. Расчету электротепловых полей посвящены работы зарубежных авторов *Okuda Greenwood*, *Ruge*.

В результате проведенных ранее работ были определены следующие принципиальные положения:

решение нелинейной электрической задачи проводится по уравнению Лапласа;

расчет температурного поля выполняется в квазилинейной постановке;

расчеты проводятся численным методом — методом конечных разностей.

В то же время целый ряд вопросов не был решен. Так, в частности, нет модели, учитывающей действие термо-э.д.с. По-разному предлагается решать вопрос по учету контактного сопротивления. Требуется более корректное определение граничных условий.

Перечисленные вопросы определили содержание научных задач:

I. Совершенствование физической и математической модели процесса путем:

- разработки способа введения контактного сопротивления;
- способа учета влияния термоэлектрических эффектов;
- учета скрытой теплоты плавления;
- определения граничных условий на поверхностях стока тепла;
- разработки алгоритма математической модели и ее реализа-

ти. Получены выражения для расчета сварочного тока, мощности источников Пельтье, скрытой теплоты плавления. Приведен прием определения теплофизических свойств в зависимости от температуры.

В главе 4 исследован вопрос об адекватности разработанной модели процесса. Установлено, что сходимость результатов расчета и экспериментальных данных весьма удовлетворительна. Так, различие по глубине проплавления между рассчитанными значениями и величинами, определенными по шлифам, не превышает 9 %, по диаметру расплавленного контакта не более 4 %, по объему литого ядра не более 8 %.

Изложенные аргументы дают право считать, что представленная модель может служить надежным инструментом в исследовании кинетики развития литого ядра при сварке униполярным импульсом тока деталей из разноименных металлов малых толщин и сечений и исследовании влияния различных возмущающих факторов на процесс формирования литого ядра. Модель позволяет исследовать влияние данных факторов и отдельно, и в комплексе. Ее можно использовать при разработке и совершенствовании технологии сварки различных сочетаний металлов. На рис. 1 показано температурное поле к концу процесса сварки деталей толщиной $0,2 \cdot 10^{-3}$ м $Mi + I2X18Ni9Ti$.

Практическое значение полярного эффекта Пельтье при сварке униполярным импульсом было выявлено достаточно давно и отмечалось многими авторами – Моравским В.Э., Кочергиным К.А., Чулошниковым П.Л. и др. В главе дается исследование результатов влияния этого эффекта при сварке Mi и нержавеющей стали $I2X18Ni9Ti$.

Решалась задача о степени влияния этого эффекта на кинетику образования литого ядра, что включает в себя определение мощности плоских источников и стоков теплоты Пельтье; характера их изменения в процессе сварки; влияния этих источников на динамику изменения температурного поля; выявление оптимального направления тока для определенного сочетания свариваемых металлов.

Анализ мощностей элементарных источников Пельтье и джоулевых показал, что они соизмеримы и к концу процесса отличаются не более, чем на 20 %.

Показано, что изменение направления тока существенно влияет на положение литого ядра. Было выбрано направление тока, обеспечивающее данную глубину проплавления для исследуемой пары металлов. Так, глубина проплавления при прямой полярности в

1,7 раза больше, чем при обратной, а диаметр расплавленного контакта в 1,1 раза.

Проводились испытания образцов, сваренных на разных полярностях и проводился статистический анализ результатов, который выявил неслучайный характер увеличения средних значений для прямой полярности тока. При этом для прямой полярности $\bar{x} = 18,87$ даН, $S = \pm 1,83$ даН, тогда как для обратной $\bar{x} = 16,2$ даН, а $S = \pm 2,95$ даН. Этот факт подтверждает существенную роль эффекта Пельтье при сварке униполярным импульсом тока деталей из разноименных металлов с резко различными теплофизическими и термоэлектрическими свойствами.

При разработке элементов технологии сварки деталей малых толщин и сечений из разноименных металлов униполярным импульсом тока встает ряд вопросов, решение которых может быть получено только на основании анализа кинетики формирования соединения. Формирование литого ядра при таком виде сварки отлично от традиционного процесса сварки одноименных металлов. Если судить по конечному результату процесса, то расположение и конфигурация литого ядра в стыке характеризуется:

различной глубиной проплавления в деталях;

разным объемом расплавленного металла;

максимальный диаметр литого ядра находится не в стыке деталей и диаметр расплавленного контакта, как правило, меньше диаметра контактной поверхности электродов.

В результате численных экспериментов было выявлено, что плавление начинается в детали с меньшей тепло- и электропроводностью. Например, при сварке деталей толщиной $\delta = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м из Mn и нержавеющей стали 12Х18Н10Т первые очаги плавления появляются к моменту времени $\tau = 2,2 \cdot 10^{-3}$ с, когда контактные сопротивления на границе деталь-деталь резко, на порядок, от начальных, уменьшаются, и, несмотря на то, что в стыке деталь-деталь все это время действовали источники тепла, связанные с контактным сопротивлением, контакт деталь-деталь не является самым нагретым местом. Анализируя дальнейший ход процесса, основываясь на математических расчетах и предварительных экспериментах, можно выделить три этапа образования литого ядра:

первый этап нагрева деталей длится от момента включения сварочного тока до достижения температуры плавления в металле с 10

более низкой тепло-, электропроводностью;

второй этап сопровождается развитием этой зоны плавления до момента достижения ею плоскости стыка свариваемых деталей;

на третьем этапе происходит переплавление плоскости контакта, сопровождающееся взаимным переплавлением деталей, до завершения развития литого ядра.

Поэтому понятно, что диаметр переплавленного контакта и глубина проплавления во многом будут зависеть от характера протекания процесса на третьей стадии. Такое развитие температурного поля снижает стабильность качества сварки разноименных металлов в случае действия возмущающих факторов.

Были проведены численные эксперименты, которые позволили прогнозировать зависимость процесса формирования ядра от времени процесса $\tau_{св}$ и падения напряжения на электродах $U_{э}$. Анализируя термические циклы, полученные из расчетов, в контрольных точках располагались на оси электрода в центре детали из Mn . Было установлено, что глубина проплавления в Mn определяется уровнем напряжения на электродах и мало зависит от времени сварки. Периферия контакта деталей, напротив, весьма чувствительна к перегревам, т.к. к концу процесса скорость нарастания температуры в контрольных точках, расположенных по периметру контакта, растет. Основываясь на данных расчетов, был получен диапазон напряжений $U_{э}$ от 1,0 до 1,1 В для сварки пары $Mn + IZXB10T$ толщиной $0,2 \cdot 10^{-3}$ м, при котором обеспечивалась необходимая глубина взаимного проплавления при минимальной вероятности внутреннего выплеска.

Основным технологическим вопросом, который решался в работе, был вопрос об определении оптимальной формы импульса тока. Применение оптимальной формы импульса тока дает возможность получения стабильного проплавления деталей без управления с обратными связями. В этом случае форма импульса тока программируется и зависит в конечном итоге от теплофизических свойств свариваемых металлов и кинетики развития соединения. Были проведены численные эксперименты, в результате которых была рассчитана оптимальная форма импульса тока. На рис. 2 показана кривая тока, полученная расчетным путем, для случая сварки пары $Mn + IZXB10T$ деталей толщиной $0,2 \cdot 10^{-3}$ м.

Были сформулированы требования к форме импульса тока, обеспечивающего

печивающей взаимное проплавление деталей из металлов с резко различными теплофизическими свойствами, которые заключаются в следующем:

импульс сварочного тока должен состоять из двух стадий с различными амплитудными значениями;

на первой стадии амплитудное значение сварочного тока определяется теплофизическими свойствами металла с более низкой тепло-, электропроводностью и обеспечивает процесс плавления этого металла;

на второй стадии амплитуда зависит от теплофизических свойств свариваемой пары металлов, определяемых температурным полем межэлектродной зоны к моменту переплавления стыка деталей.

Предложена схема силовой части сварочной машины с разделенными цепями заряда и разряда, на которой был реализован импульс сварочного тока по сформулированным требованиям. Было испытано на срез по 100 образцов, сваренных традиционным импульсом тока и рекомендуемым. В результате получили следующие статистические показатели для одностадийного процесса:

среднее значение $\bar{X} = 19,35$ дАН; среднеквадратичное отклонение $S = 1,35$ дАН и вероятность получения соединения с гарантированным проваром $P = 83,1\%$, а для двухстадийного импульса:

$\bar{X} = 20,85$ дАН; $S = 1,097$ дАН; $P = 92,2\%$.

Это дает основание считать, что сварка на двухстадийном импульсе обеспечивает более высокую стабильность качества по сравнению со сваркой одностадийным импульсом.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что повышение стабильности взаимного проплавления деталей малых толщин и сечений из разноименных металлов при сварке униполярным импульсом тока может быть обеспечено при верном выборе направления импульса тока и его формы, основанном на математическом моделировании процесса, учитывающего контактные сопротивления, нелинейность теплофизических свойств свариваемых металлов, энергию фазового перехода, термические сопротивления на границах электрод-деталь, термоэлектрические эффекты.

2. Определение полей потенциалов и плотностей тока для расчета внутренних источников тепла следует проводить с учетом контактных сопротивлений. В этом случае приконтактная область может

12

ция в программе расчета на ЭВМ.

2. Разработка элементов рациональной технологии контактной сварки разноименных металлов, обеспечивающей взаимное проплавление свариваемых деталей.

В главе II в соответствии с поставленными научными задачами были определены граничные условия, связанные со стоком тепла в электроды и в массу металла, окружающего зону контакта, учитывающие изменения температуры в процессе сварки на границах расчета. Так, на границах рассчитываемой области принималось граничное условие первого рода.

В контакте деталь—деталь принималось условие четвертого рода. В контакте электрод—деталь помимо условия непрерывности теплового потока решалась краевая задача, характерная для условия 2-го рода, что связано с двумя факторами: наличием мощных внутренних источников тепла и присутствием термических сопротивлений в контактах. Определены также граничные условия для расчета электрического поля. Дано обоснование введения предложенных схем расчета.

Проводился учет скрытой теплоты плавления введением в уравнение Фурье стока тепла, мощность которого определяется энтальпией фазового перехода. Зависимости теплофизических свойств от температуры учитывались путем их кусочно-линейной аппроксимации.

Разработан метод учета контактных сопротивлений, который сводится к тому, что приконтактная область имитируется прослойкой, обладающей удельным электросопротивлением

$$\rho_{np}(T, \tau) = \rho_M(T) + \rho_K(T, \tau),$$

где ρ_{np} — удельное электросопротивление прослойки;
 ρ_M — удельное электросопротивление материала контакта;
 ρ_K — удельное приконтактное сопротивление.

Последнюю составляющую следует находить как

$$\rho_K(T, \tau) = R_K(T, \tau) \cdot S_K / l_K,$$

где S_K — площадь контактной поверхности;
 l_K — толщина приконтактного слоя;
 R_K — сопротивление контакта.

При этом условились о том, что толщина приконтактного слоя в процессе расчета не изменяется $l_K = const$. При соблюдении ограничений, накладываемых на условия расчета величины приконтактного слоя, было получено выражение для его определения

$$\ell_k = 2 \cdot t_g \left[\frac{R_n \cdot 2\pi \cdot r_n \cdot n}{\rho_1 + \rho_2} \right] \cdot r_n,$$

где R_n — холодное сопротивление контакта;
 r_n — величина радиуса элементарного пятна контактирования;
 n — количество пятен контактирования;
 ρ_1, ρ_2 — удельные электросопротивления контактируемых металлов.

Величина радиуса элементарного пятна контактирования и их количество находится также расчетным путем. Предложена зависимость изменения $R_k = f(T, \tau)$ от температуры, которая предполагает учет пластической деформации микронеровностей поверхностей контактов.

$$R_k(T, \tau) = (R_n - R_c) \left(1 - \frac{T(\tau)}{T_{kp}} e^{(1 - T(\tau)/T_{kp})} \right) + R_c,$$

где R_k — контактное сопротивление от сближения линий тока элементарными пятнами контактирования, Ом;

R_n — сопротивление холодного контакта (начальное), Ом;

$T(\tau)$ — температура, определяемая термическими циклами в точках контакта, °C;

R_c — стабилизированное контактное сопротивление, соответствующее полному смятию микронеровностей, Ом;

T_{kp} — критическая температура, при которой происходит полное сближение контактируемых поверхностей, °C.

Зная зависимость σ_T от температуры для контактируемых металлов, можно рассчитать критическую температуру T_{kp} , при которой произойдет смятие микронеровностей, т.к. полное сближение может произойти при определенном значении σ_T , которое находится как:

$$\sigma_T(T) = 4\rho / (C' \cdot \delta \cdot \varepsilon^2 \cdot d_k^2 \cdot \pi),$$

где δ, γ — коэффициенты, зависящие от шероховатости контактирующих поверхностей;

ε — величина относительного сближения. Для случая полного смятия $\varepsilon = 2/3$;

C' — коэффициент стеснения, учитывающий увеличение σ_T при пластической деформации.

Метод учета контактных сопротивлений разрабатывался с использованием экспериментальных данных.

Применялись традиционные методы осциллографирования электрических параметров.

Предложен способ расчета термических сопротивлений, который

дает возможность учета данной составляющей в граничных условиях в контактах электрод-деталь.

Метод учета сводится к тому, что определяется термическое сопротивление от стягивания линий теплового потока. Получено выражение для расчета термического сопротивления в начальный момент времени сварки:

$$\beta_k = \frac{(h_{cp1} + h_{cp2})(1-m)(1-\varepsilon) \psi_a \cdot A_n}{(h_{cp1} + h_{cp2})(1-m)(1-\varepsilon) \varepsilon r_n \cdot \lambda_m \cdot n + \psi_a \cdot A_n \cdot \lambda_o}$$

В этом выражении h_{cp1}, h_{cp2} — средняя высота микровыступов первого и второго контактируемых металлов; m — коэффициент заполнения профиля неровностей; ψ_a — коэффициент стягивания линий теплового потока к пятнам фактического контакта, который выбирается в зависимости от относительной площади контакта $\eta_3 = A_r / A_n$, где A_r — фактическая площадь контакта, а A_n — номинальная по номограмме; n — количество пятен контактирования; r_n — радиус элементарного пятна контактирования; λ_m — приведенная теплопроводность контактируемых металлов. Закон изменения термического сопротивления в процессе сварки аналогичен закону изменения контактного сопротивления.

Наличие термоэлектрических эффектов при точечной сварке деталей из разноименных металлов униполярным импульсом тока и их неоднозначное влияние на характер развития литого ядра требует разработки способа учета одного из наиболее значительных для данного процесса эффекта, эффекта Пельтье. Были определены границы исследуемого явления, ограничения и допущения:

рассматривается действие только эффекта Пельтье;

эффекты Зеебека и Томсона не рассматриваются;

считается, что проявление эффекта Пельтье от начала процесса до момента переплавления границы контакта связано с термоэлектрическими свойствами контактируемых металлов;

термоэлектрические свойства металлов не являются величинами постоянными и ведется учет зависимости их от температуры;

обратимое выделение или поглощение теплоты в контакте зависит от термоэлектрических свойств.

В главе описан принцип введения в модель термоэлектрического эффекта Пельтье. Предложено локализовать выделение теплоты Пельтье в объеме элементарной ячейки, примыкающей к контакту, с учетом потерь на теплопроводность. Удельную мощность источников следует рассчитывать как:

$$W_n(r, z, \tau) = \pm [\rho_1(\tau) - \rho_2(\tau)] J_{c\delta}(\tau) \cdot T(r, z, \tau) / \Delta v,$$

где ρ_1, ρ_2 — величины термо-э.д.с. металлов при температуре $T(r, z, \tau)$;

$T(r, z, \tau)$ — температура рассчитываемой точки контакта;

$J_{c\delta}(\tau)$ — величина тока на момент расчета;

Δv — элементарный удельный объем приконтактной области.

Таким образом, проведенные исследования позволили сформулировать основные положения и принципы построения математической модели процесса контактной точечной конденсаторной сварки.

В третьей главе даны схемы численного решения дифференциальных уравнений, описывающих электротепловые процессы в межэлектродной зоне. Даны основные параметры расчета методом конечных разностей. Приводится аппроксимация уравнений теплопроводности с учетом поставленных граничных условий в контакте электрод-деталь, деталь-деталь и на границе области определения температур. Так, на границе электрод-деталь переменный тепловой поток в электрод определяется следующим образом:

$$\omega_c^m = (T_{i,j}^m - T_k^m) \cdot (\lambda_9^m - \frac{\ell_k}{\beta_k^m}) / h_9,$$

где T_k — температура контакта на шаге расчета m ;

β_k — термическое сопротивление контакта;

ℓ_k — толщина слоя приконтактной области;

λ_9 — теплопроводность металла детали.

При этом температура контакта должна вычисляться по следующей формуле:

$$T_k^m = \{ T_{i,j}^m [C_1^m + (\lambda_9^m - \frac{\ell_k}{\beta_k^m}) \cdot \frac{h_3 \cdot C_2^m}{\lambda_3^m \cdot h_9 \cdot q_3^m} \cdot \text{ierfc} q_3^m] + \\ + T_{i,j}^m \cdot C_2^m \} / [C_2^m + (\lambda_9^m - \frac{\ell_k}{\beta_k^m}) \cdot \frac{h_3 \cdot C_2^m}{\lambda_3^m \cdot h_9 \cdot q_3^m} \cdot \text{ierfc} q_3^m],$$

где λ_3 — теплопроводность металла электрода;

C_1, C_2 — коэффициенты, учитывающие непрерывность теплового потока;

$$q_3^m = \frac{h_3}{2\sqrt{\alpha_3^m \cdot \Delta \tau}}$$

h_3 — величина расчетной области в электроде;

α_3 — температуропроводность металла электрода.

Индекс m в выражениях обозначает то, что величины переменных зависят от температуры.

В данной главе приводятся аппроксимации уравнений, описывающих электрическое поле в межэлектродной зоне. Даны способы учета контактных сопротивлений при соблюдении условия непрерывности

имитироваться прослойкой, обладающей удельным электросопротивлением, которое складывается из удельных электросопротивлений контактируемых металлов и удельного электросопротивления, возникающего за счет стягивания линий тока элементарными пятнами контактирования. Предложена зависимость удельного электросопротивления приконтактного слоя от температуры. Расчет толщины приконтактного слоя проводится для холодного состояния с учетом пластической деформации микронеровностей и остается неизменным в процессе всего расчета.

3. Исследование процесса конденсаторной сварки деталей из разноименных металлов показало необходимость введения в модель процесс эффекта Пельтье, существенно влияющего на температурное поле и, как следствие, на прочностные свойства соединений. Для этого необходимо:

расчет стоков и источников теплоты Пельтье вести на протяжении всего процесса сварки;

выделение теплоты Пельтье локализовать в приконтактной зоне, ограниченной величиной элементарной ячейки;

значение термо-э.д.с. контактируемых металлов вводить температурными зависимостями.

4. Установлено, что при расчете температурных полей, возникающих в процессе сварки разноименных металлов униполярным импульсом тока, при описании граничных условий в контакте электрод-деталь, необходимо учитывать наличие внутренних источников джоулева тепла переменной мощности, источников теплоты Пельтье и термических сопротивлений при соблюдении условия непрерывности теплового потока.

5. Разработан алгоритм расчета математической модели контактной точечной сварки разноименных металлов униполярным импульсом тока, реализованный в программе расчета на ЭВМ, в котором предложен новый способ описания граничных условий методом введения массива определяющих коэффициентов. Программа позволяет рассчитывать:

температурные и электрические поля с шагом по времени процесса 20 мкс;

термические циклы в контрольных точках межэлектродной зоны, определяющие характер взаимного проплавления деталей и вероятности образования внутренних выплесков;

изменение в процессе сварки мощности джоулевых источников тепла и источников теплоты Пальтье в приконтактной зоне стыка свариваемых деталей и границ электрод-деталь;

форму импульса сварочного тока.

Установлено, что форма и положение изотермы плавления, полученные расчетным путем, соответствуют литому ядру, определенному по макрошлифам.

6. В результате математических расчетов и экспериментов выявлены закономерности образования литого ядра при контактной точечной сварке металлов с резкоразличными теплофизическими свойствами, заключающиеся в том, что процесс происходит в три этапа:

первый этап нагрева деталей длится от момента включения тока до достижения температуры плавления в металле с более низкой тепло-, электропроводностью;

второй этап сопровождается развитием этой зоны плавления до момента достижения ею плоскости стыка свариваемых деталей;

на третьем этапе происходит переплавление плоскости контакта с прождающееся взаимным проплавлением деталей, до завершения развития литого ядра.

7. Сформулированы требования к форме импульса сварочного тока, обеспечивающей взаимное проплавление деталей из металлов с резкоразличными теплофизическими свойствами, которые заключаются в следующем:

импульс сварочного тока должен состоять из двух стадий с разными амплитудными значениями;

на первой стадии амплитудное значение сварочного тока определяется теплофизическими свойствами металла с более низкой тепло-, электропроводностью и обеспечивает процесс плавления этого металла;

на второй стадии амплитуда тока зависит от теплофизических свойств свариваемой пары металлов, определяемых температурным полем межэлектродной зоны к моменту переплавления стыка деталей. Так, для случая сварки деталей толщиной 0,2 мм из $\mathcal{A}_1$ и нержавеющей стали 12Х18Н10Т были определены следующие параметры режима:

$$I_{m1} = 1,12 \text{ кА}, \tau_{m1} = 1,19 \cdot 10^{-3} \text{ с}; I_{m2} = 1,7 \text{ кА}, \tau_{m2} = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \tau_{сб} = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

8. Разработаны рекомендации по использованию программ расчета температурных полей и формы импульса сварочного тока при

конденсаторной точечной сварке деталей малых толщин и сечений. Рекомендации реализованы при сварке узлов реле.

9. Сравнительная оценка качества сварных соединений показала, что при сварке двухстадийным импульсом тока, реализованного по сформулированным требованиям, стабильность прочностных показателей при сварке пары $Ni + IZ\dot{X}I8NIOT$ возрастает до 92,2 % по сравнению с 83,1 % при сварке импульсом тока традиционной формы.

10. Разработанный пакет программ расчета параметров импульса тока для сварки деталей малых толщин и сечений из разноименных металлов передан для освоения в ХПО "Радиореле".

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Математическая модель температурного поля при точечной сварке униполярным импульсом тока / А.П. Исаев, В.С. Витушкин, А.А. Моргун, В.С. Лавренев // Прогрессивные технологии и конструкции, механизация и автоматизация производственных процессов в машино- и приборостроении: Тезисы докладов межвузовской научно-технической конференции. - Калуга, 1987. - с. 13-14.

2. Метод учета контактного сопротивления в математической модели контактной точечной сварки / А.А. Моргун, А.П. Исаев, В.С. Витушкин // Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. - Калуга, 1989. - с. 27-28.

*Моргун
Васин 13.07.90*

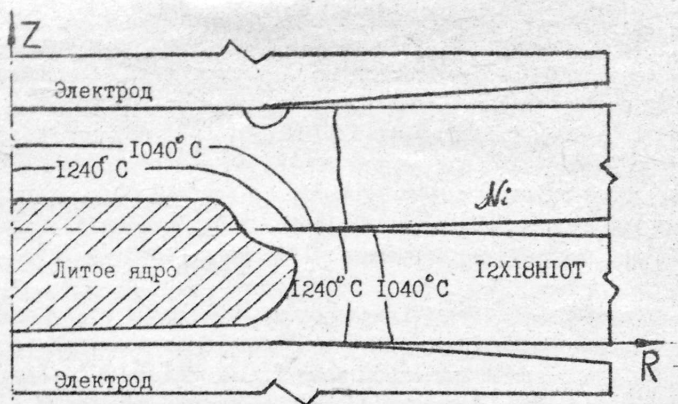


Рис.1 Температурное поле к концу процесса сварки.

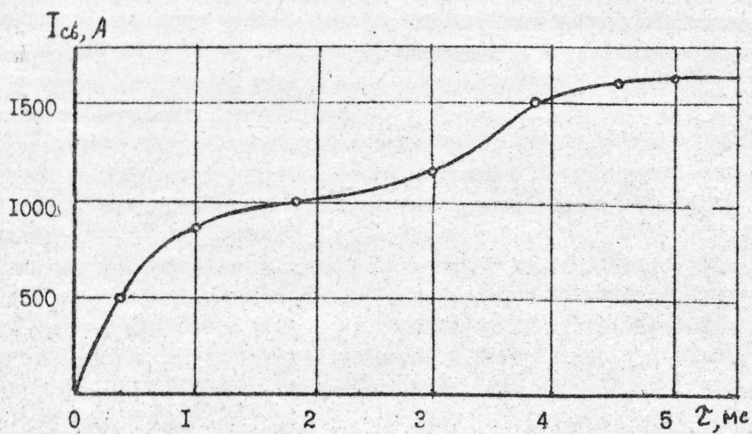


Рис.2 Кривая тока, полученная расчетным путём.