

М255556

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

ИСАКЪ Анатолий Петрович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА КОНДЕНСАТОРНОЙ ТОЧЕЧНОЙ
СВАРКИ С АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА
СВАРКИ ДЕТАЛЕЙ ТОЛЩИНОЙ 0,1-0,3 мм

(05.04.05 - Технология и машины сварочного производства)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им.Баумана

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

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор ОРЛОВ Б.Д.

Кандидат технических наук КИТАЕВ А.М.

Ведущее предприятие — Калужский радиоламповый завод.

Автореферат разослан " " 1975 г.

Защита диссертации состоится " " 1975 г.
на заседании Совета

Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного

Знамени высшего технического училища им. Н.Э.Баумана

по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская ул. дом 5.

про

печатью,

реке Училища.

М255556

3

ноз л. 41465
от 11/11/1975г.



1255556

Исаев А.П. Разработка и и

В В Е Д Е Н И Е

Актуальность проблемы. Одной из основных технологических операций получения неразъемных соединений при производстве изделий электронной техники и точного приборостроения является контактная и, в частности, конденсаторная точечная электросварка, от качества выполнения которой в сильной мере зависит долговечность и надежность изделий. Поэтому актуальной задачей сварочной техники является дальнейшее повышение стабильности и улучшение прочностных свойств сварных соединений при одновременном предупреждении непроваров и выплесков расплавленного металла.

Цель исследования. Целью настоящей работы являлось изыскание путей и разработка средств повышения стабильности качества сварных точечных соединений из никеля, латуни, кобальта и нержавеющей стали толщиной от 0,1 до 0,3 мм, применительно к производству изделий приборостроения и электронной техники. Эта цель была достигнута на базе разработки способа конденсаторной точечной сварки с автоматическим регулированием параметров режима. При этом были учтены результаты исследований, проведенных в МВТУ им. Н.Э.Баумана, ИЭС им. Е.О.Патона, ВНИИЭСО, МАТИ и других организациях.

Методы исследования. Работа выполнена путем сочетания экспериментальных исследований с теоретическими разработками. Основными методами экспериментальных исследований являлись: осциллографирование электрических параметров процесса сварки, металлографический анализ и испытание на прочность сварных соединений. При этом было создано и разработано экспериментальное оборудование, методика измерения электрических параметров процесса сварки и методика исследования кинетики формирования соединений. Обработка результатов экспериментов проводилась с использованием методов математической статистики.

Научная новизна. В результате проведенных исследований были сформулированы необходимые и достаточные условия получения литого ядра определенных размеров. При этом было установлено, что с температурными условиями формирования соединения связано падение напряжения на сварочном контакте. Это положение подтверждено многочисленными исследованиями с использованием разработанного расчетно-экспериментального метода определения напряжения контактного плавления при сварке.

Практическая ценность. В результате исследований удалось обобщить и сформулировать требования к управляемому процессу и раз-

работать оборудование и способ конденсаторной точечной сварки с непрерывным поддержанием на заданном уровне мгновенных значений падения напряжения на электродах и стабилизацией длительности стадии плавления. Такая организация процесса сварки позволила повысить статистические показатели качества сварных соединений, исключить появление выплесков и полностью устранить непровар при действии возмущений по состоянию поверхности деталей, усилию сжатия и диаметру электродов.

Работа состоит из четырех глав, содержит 194 страницы, 58 рисунков и 16 таблиц. В списке используемой литературы приведено 107 наименований.

В первой главе обосновывается постановка задачи работы, анализируются современные способы автоматического регулирования кратковременных процессов сварки и формулируются задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке методики проведения экспериментальной части исследований. В третьей главе рассматривается кинетика формирования сварного точечного микросоединения при неуправляемом процессе сварки, формулируются необходимые и достаточные условия получения литого ядра определенных размеров. Выбирается параметр регулирования и закон его изменения в процессе сварки. Четвертая глава посвящена разработке и исследованию способа сварки и оборудования с автоматическим управлением параметрами режима. При этом основное внимание уделяется вопросам повышения стабильности качества и технологическим особенностям управляемого процесса сварки.

Основные положения работы были доложены и получили апробацию на совместном научном семинаре общественного НИИ кафедр сварочного производства г. Москвы.

Глава I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЗАДАЧИ И ПРЕДПОСЫЛКИ К ИХ РЕШЕНИЮ

В связи с развитием новейших отраслей техники и увеличением выпуска изделий электронной техники и точного приборостроения резко повысились требования к абсолютным значениям и особенно стабильности показателей качества сварных соединений, выполняемых контактной сваркой. Наибольшие трудности в получении сварных соединений стабильного качества и его возможной визуальной оценки возникают при точечной сварке листовых нахлесточных соединений. Это обусловлено, в первую очередь, случайным характером контактирования плоских деталей и затрудненными условиями пластического деформирования металла при сварке. Поэтому в настоящем исследовании основное внимание уделено таким

соединениям с диапазоном свариваемых толщин металла от 0,1 до 0,3 мм.

Из большого ассортимента металлов и сплавов, применяемых в электронных приборах, для проведения экспериментальных исследований выбраны такие широко используемые металлы, как никель, латунь, ковар и нержавеющая сталь, т.е. металлы с резко различными теплофизическими свойствами.

В качестве базового способа был выбран способ конденсаторной сварки, поскольку конденсаторные машины при их рациональной конструкции обеспечивают высокую стабильность геометрии импульса сварочного тока и постоянство усилия сжатия, которые являются важными условиями получения высокого качества соединений. Однако, при сварке соединений, к которым предъявляются особо высокие требования к стабильности показателей качества, реализация указанных двух условий является недостаточной, так как известно, что протекание процесса и результаты сварки зависят еще от целого ряда факторов, могущих изменяться от сварки к сварке для одних и тех же соединений.

Для выяснения возможного влияния возмущений на протекание процесса конденсаторной сварки и стабильность прочностных показателей сварных соединений были проведены эксперименты по сварке пластин никеля толщиной $\delta = 0,15 \pm 0,15$ мм и нержавеющей стали толщиной $\delta = 0,2 \pm 0,2$ мм. Оценка стабильности прочности при испытании образцов на отрыв производилась по гистограммам, при этом определялись среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариации и рассчитывалась вероятность получения соединений с требуемым показателем прочности.

В результате проведенных исследований было установлено, что при обычной конденсаторной точечной сварке даже в лабораторных условиях в результате действия возмущающих факторов наблюдается разброс прочностных показателей и вероятность получения соединений с требуемым показателем прочности не превышает 93%.

Анализ литературных данных показывает, что при сварке переменным током промышленной частоты на серийном оборудовании не удается получать более высокие и стабильные показатели качества.

Поэтому целью данной работы являлось нахождение путей и разработка средств повышения стабильности показателей качества сварных соединений, при условии существенного влияния на процесс образования соединения таких возмущающих факторов как неодинаковое состояние поверхности деталей, износ и окисление рабочих торцов электродов, изменение усилия сжатия и др.

Работы отечественных и зарубежных исследователей показывают, что повысить стабильность качества и надежность сварных микросоединений

возможно на базе разработки автоматически управляемого процесса сварки. Однако применительно к сварке микродеталей этот вопрос изучен недостаточно полно. Это объясняется тем, что в настоящее время нет возможности контролировать процесс микросварки непосредственно по размерам литого ядра и значительной сложностью построения системы регулирования, которая была бы способна реализовать требуемый закон управления.

В связи с этим возникает необходимость поиска наиболее приемлемых параметров регулирования. Оценивалась возможность использования в качестве датчиков сигнала обратной связи температуры околоэлектродной области и инфракрасного излучения с поверхности деталей, дилатометрического эффекта, ультразвуковых колебаний и электрических параметров процесса сварки. В результате анализа и исходя из опыта ранее проведенных работ в МВТУ им. Н.Э.Баумана, ИЭС им. Е.О.Патона и др. организациях было установлено, что реализовать управляемый процесс наиболее просто и технически надежно, если в качестве сигнала обратной связи использовать падение напряжения между электродами.

В простейшем случае регулирование по падению напряжения на электродах осуществляется путем прекращения процесса сварки в тот момент, когда величина напряжения достигает заданного значения. Анализ литературных данных и собственные исследования работы регуляторов дискретного действия показали, что хотя в отдельных случаях и удается получить качественные сварные соединения, в целом такой принцип регулирования не может гарантировать достижение стабильных показателей качества сварки. Такое дискретное регулирование не позволяет управлять процессом сварки непрерывно в течение всего процесса и получать в каждом конкретном случае требуемую геометрию импульса сварочного тока.

В настоящее время принцип непрерывного управления при кратковременном импульсном нагреве реализован лишь для односторонней сварки с микрозазором, когда для коммутации необходимой мощности применяются мощные полупроводниковые триоды, которые включаются либо последовательно, либо параллельно с первичной обмоткой сварочного трансформатора. Проведенные в МВТУ им. Н.Э.Баумана исследования технологических возможностей таких регуляторов свидетельствуют о перспективности непрерывного управления процессом сварки по падению напряжения на электродах.

Однако для контактной точечной сварки при двустороннем токоподводе, где требуются мощности на порядок больше, применить тран-

6.

испорченный ключ для регулирования тока в сотни и тысячи ампер не представляется возможным. Поэтому в данной работе эта проблема решалась на базе использования для целей коммутации больших мощностей четырехслойных полупроводниковых приборов — тиристоров и методов их принудительного выключения.

Поскольку рассматриваемый принцип управления процессом точечной микросварки до последнего времени практически не реализован, многие вопросы, связанные с экспериментально-теоретическим обоснованием выбранного параметра и законом его изменения в процессе сварки, разработаны недостаточно. Поэтому при разработке управляемого способа сварки необходимо было решить следующие задачи: исследовать и выявить взаимосвязи между кинетикой формирования точечного микросоединения, основными параметрами режима конденсаторной сварки и законом изменения падения напряжения на сварочном контакте; сформулировать условия достижения стабильных размеров литого ядра и отсутствия выплесков расплавленного металла; разработать программу управления процессом сварки по выявленному параметру регулирования; разработать автоматический регулятор с непрерывным управлением мгновенным значением регулируемого параметра; исследовать технологические возможности разработанного регулятора и особенности управляемого способа конденсаторной сварки.

Глава II. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения рассматриваемых задач необходимо было разработать экспериментальное оборудование и методику проведения исследований.

А. Оборудование. При проведении экспериментов сварка осуществлялась на разработанной конденсаторной сварочной машине типа К-47М. Отличительными особенностями этой машины являются: наличие специального нажимного устройства, обладающего высокими динамическими характеристиками и пружинным дозированием усилия сжатия, снабженное оригинальным электромагнитным приводом с гидравлическим демпфером; наличие тиристорного дозатора энергии, обеспечивающего в широких пределах регулирование геометрии импульса сварочного тока и необходимую точность поддержания напряжения на батарее конденсаторов за счет наличия обратной связи по регулируемой величине.

Б. Методика измерения электрических параметров процессов сварки. При определении взаимосвязи между электрическими параметрами процесса сварки и размерами литого ядра необходимо регистрировать падение напряжения на деталях. Однако в литературе не встречается

сведений о фактической базе измерения при регистрации падения напряжения со свариваемых деталей и отсутствуют обоснованные рекомендации по технике этих измерений. Для выяснения этих вопросов была построена неоднородная плоская модель сварного соединения и проанализированы потенциальные поля. В основу построения модели были положены теоретические представления о подобии процессов распространения теплового потока и электрического тока, развитые и обоснованные Кольраушем и Хольмом, применительно к электрическому контакту. Моделирование позволило установить, что база измерения падения напряжения с деталей совпадает с положением концевых эквипотенциальных линий, расположение которых зависит от размеров ядра, и к началу образования литого ядра концевые эквипотенциали равно отстоят от плоскости контактов деталь-деталь и электрод-деталь.

При проведении экспериментов визуальное наблюдение и регистрация падения напряжения различных участков междуэлектродной области и сварочного тока производилась с помощью электронных и шлейфовых осциллографов С1-19 и Н102.

В. Методика исследования кинетики формирования соединения. В соответствии с задачами исследований была разработана методика исследования кинетики развития литого ядра, основанная на принудительном прекращении процесса сварки в любой наперед заданный момент времени и изучении теплового воздействия различных частей импульса тока на формирование соединения. С этой целью была разработана специальная электрическая схема, позволяющая прекращать протекание тока через зону сварки. Оценка теплового воздействия различных частей импульса сварочного тока производилась по результатам металлографического анализа и испытаниям сварных соединений на прочность.

При исследовании кинетики формирования соединения для получения сопоставимых результатов и выявления возможных причин, нарушающих стабильность протекания процесса была разработана методика оценки исходного состояния зоны сварки перед включением сварочного тока, путем измерения "холодных" контактных сопротивлений различных участков междуэлектродной области. Для этого была создана электрическая схема, позволяющая после проведения необходимых измерений осуществлять процесс сварки без изменения положения свариваемых деталей и переключений во вторичной сварочной цепи.

Глава III. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СВАРНОГО ТОЧЕЧНОГО МИКРОСОЕДИНЕНИЯ ПРИ НЕУПРАВЛЯЕМОМ ПРОЦЕССЕ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ.

При выполнении экспериментов по определению взаимосвязей между электрическими параметрами процесса сварки и кинетикой формирова-

ния соединений основное внимание было уделено исследованию процесса плавления металла, который является главным в формировании соединения.

Эксперименты с принудительным выключением сварочного тока проводились для пластин никеля толщиной $\delta = 0,1 \text{ мм}$, притертых в электродах сварочной машины. Сопоставление многочисленных осциллограмм с данными металлографического анализа и результатами испытаний соединений на срез позволило установить, что первый зафиксированный металлографически макроочаг плавления металла возникает к моменту достижения на контакте деталь-деталь максимального значения падения напряжения, при практически постоянном значении которого протекает стадия плавления. Этот вывод хорошо согласуется с представлениями теории электрического контакта, устанавливающей однозначную математическую зависимость между температурой перегрева (θ) металлической контактной поверхности и величиной падения напряжения на контакте (U). Эта зависимость записывается в следующем виде:

$$\int_0^{\theta} \rho \lambda d\theta = \frac{U^2}{8}, \quad (I)$$

где: ρ и λ - соответственно удельное электросопротивление и теплопроводность материала контакта;

θ и U - соответственно температура перегрева и напряжение на контакте.

Анализ уравнения (I) и предварительные расчеты позволили установить, что им можно воспользоваться для расчета напряжения контактного плавления при сварке при введении в него граничных условий соответствующих условиям сварки.

Исследовалось влияние окисных пленок на формирование соединения и характер изменения падения напряжения на деталях. Исследования показали, что наличие окисных пленок в основном оказывает влияние на протекание первой стадии формирования соединения, которая характеризуется неустановившимся значением напряжения на сварочном контакте. На стадии развития литого ядра закон изменения напряжения логичен для деталей притертых в электродах машины и в состоянии поставки.

Найденная взаимосвязь между фактом плавления металла в плоскости контакта, т.е. $T_{пл}$, и достижением на контакте деталь-деталь напряжения плавления при сварке, позволила сделать предположение, что по характеру изменения напряжения $U_{св}$ можно судить о температурных условиях в зоне сварочного контакта и получаемых размерах ядра.

Для выяснения этой взаимосвязи были поставлены опыты по конденсаторной сварке никеля, латуни, кобальта и нержавеющей стали при различных значениях усилия сжатия ($P_{сж}$), емкости батареи конденсаторов ($C\delta$) и напряжения её зарядки (U_3). Опыты проводились исходя из условия обязательного получения для каждого выбранного значения $P_{сж}$ и $C\delta$ литого ядра при отсутствии выплесков металла. С этой целью в каждом случае экспериментально подбирался максимально возможный сварочный ток, путем изменения U_3 .

Проведенные эксперименты позволили установить, что для рассматриваемых сочетаний ($P_{сж}-U_3$) и ($C\delta-U_3$) получение литого ядра определенных размеров связано с выполнением двух условий: 1. необходимо на сварочном контакте деталь-деталь достичь напряжения плавления; 2. обеспечить определенное время пребывания контакта при этом напряжении. Кроме того, эксперименты показали, что напряжение контактного плавления при сварке зависит от скорости нарастания тока, усилия сжатия и толщины металла. В связи с этим было высказано предположение, что эта взаимосвязь обусловлена влиянием указанных величин на скорость нарастания температуры по толщине свариваемых пластин вдоль оси электродов.

Для подтверждения положения о взаимосвязи между температурным режимом нагрева деталей и величиной падения напряжения на контакте деталь-деталь был разработан расчетно-экспериментальный метод определения напряжения контактного плавления при сварке.

Расчет производился по известному уравнению Кольрауша:

$$U^2 = 4L(T_{пл}^2 - T_0^2), \quad (2)$$

где: U - напряжение на контакте; L - функция Лоренца;

$T_{пл}$ - температура плавления металла контакта (в $^{\circ}K$); T_0 - температура (в $^{\circ}K$) на концевых поверхностях, с которых фиксируется контактное падение напряжения. Для того, чтобы воспользоваться этим уравнением для условий конденсаторной сварки деталей малых толщин, необходимо знать температуру T_0 к моменту достижения в плоскости контакта температуры плавления. Для приближенных качественных расчетов при линейном распространении теплоты можно принять, что

$$T_0(x, t) \approx T_{пл} \left(1 - \frac{x}{\sqrt{\kappa t}} \int_0^{\sqrt{\kappa t}} e^{-y^2} dy \right); \quad (3)$$

$$d = \frac{x}{2\sqrt{at}}; \quad a = \frac{\lambda}{c\gamma}. \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) $T_0(x, t)$ - температура на расстоянии $x=0,5\delta$ от плоскости контакта с температурой $T_{пл}$ к моменту t_1 .

Момент времени t_1 , когда достигается в контакте $T_{пл}$ и соответствующие ей максимальное значение падения напряжения на деталях определялся по осциллограммам. Проведенные по уравнениям (2и3) расчеты показали, что разработанная методика определения напряжения плавления при сварке дает высокую сходимость с экспериментальными данными (не хуже $\pm 10\%$).

При этом было подтверждено, что величина падения напряжения на деталях к моменту достижения температуры плавления зависит от мгновенной разности (или среднего градиента) температуры в зоне контакта деталь-деталь. Расчеты показали, что чем больше мгновенная разность температуры, тем выше величина падения напряжения на деталях. Эти данные позволяют охарактеризовать "жесткость" режима сварки по величине падения напряжения на сварочном контакте. Чем больше это напряжение, тем относительно более "жесткий" режим сварки и наоборот.

Известно, что различного рода возмущения приводят к изменению условий тепловыделения в зоне образования литого ядра и к нарушению стабильности процесса сварки и к появлению дефектных сварных соединений с выплеском и непроваром. Вместе с тем изменение температурных условий должно отразиться на характере изменения и величине напряжения на контакте и привести к нарушениям в необходимых и достаточных условиях для получения литого ядра определенных размеров. Изучение этого вопроса показало, что комплекс возмущающих факторов приводит к отклонениям от номинального закона изменения падения напряжения на сварочном контакте. При этом было установлено, что для всех исследованных пар металлов уменьшение напряжения на сварочном контакте на $10+15\%$ или времени пребывания контакта при номинальном напряжении на $30+40\%$ сопровождается уменьшением диаметра литого ядра на $20+30\%$, а глубины проплавления на $50+60\%$. Высказано мнение, что образование начального выплеска связано с ростом фактической скорости нагрева металла в контакте деталь-деталь. При этом, как показали опыты, величина падения напряжения на контакте увеличивается на $15+20\%$ по сравнению с максимально допустимой. Конечный выплеск образуется, как правило, при превышении фактической длительности стадии роста литого ядра над максимально допустимой для выбранных значений d и $R_{сж}$.

Проведенное экспериментально-теоретическое исследование неуправляемого процесса контактной конденсаторной точечной микросварки при двустороннем токоподводе позволило наметить пути его совершенствования на базе разработки автоматически управляемого процесса сварки.

Управляемый процесс должен: 1. обеспечить получение литого ядра стабильных размеров; 2. гарантировать отсутствие непроваров; 3. гарантировать отсутствие начальных и конечных выплесков; 4. обеспечить возможность регулирования размеров литого ядра и степени "жесткости" режима сварки. Реализовать указанные требования возможно, если на сварочном контакте автоматически поддерживать на заданном уровне мгновенные значения напряжения за весь период сварки и стабилизировать при этом фактическую длительность стадии плавления.

Глава IV. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОГО СПОСОБА СВАРКИ

Для реализации автоматически управляемого процесса был разработан специальный регулятор, в котором непрерывное поддержание постоянного напряжения на контакте осуществляется за счет отрицательной обратной связи по регулируемой величине, путём изменения мгновенного значения сварочного тока в зависимости от знака сигнала рассогласования между заданным и действительным падением напряжения. В регуляторе изменяются два параметра режима: напряжение на сварочном контакте от $0,3 \pm 1,5$ В и время включения тока (время сварки) от 1 до 10 мс.

Предварительное исследование управляемого процесса показало, что при использовании в качестве сигналов обратной связи как падения напряжения на сварочном контакте $-U_{\text{св}}$, так и на электродах $-U_{\text{эл}}$, размеры литого ядра и характер изменения электрических параметров отличаются незначительно. Поэтому все дальнейшие исследования осуществлялись при управлении по $U_{\text{эл}} = \text{const}$, что значительно упрощает технику снятия сигнала обратной связи независимо от размеров деталей.

При проведении экспериментов при управлении по $U_{\text{эл}} = \text{const}$, в постоянном времени включения сварочного тока ($t_{\text{св}} = \text{const}$) было установлено, что, хотя при сварке и обеспечивается получение литого ядра и отсутствие начальных выплесков, стабильность размеров ядра и прочностных показателей соединений всё же недостаточно высока. В связи с этим было выдвинуто предположение, что при управлении по $U_{\text{эл}} = \text{const}$ и $t_{\text{св}} = \text{const}$ строго выполняется лишь первое необходимое условие получения литого ядра определенных размеров — достижение в контакте напряжения плавления, а фактическая длительность стадии плавления ($t'_{\text{св}}$) при этом напряжении различна из-за действия возмущающих факторов.

Решение задачи о стабилизации длительности стадии плавления базируется на исследовании кинетики формирования соединения при управлении по $U_{\text{эл}} = \text{const}$. Было установлено, что отсчитывать время стадии плавления ($t'_{\text{св}}$) необходимо с момента достижения перегрева на кри-

12.

вой сварочного тока, когда резко уменьшается скорость изменения мгновенных значений сварочного тока и $\frac{di_{св}}{dt}|_{t=t_1}$ стремится к нулю.

Такое управление процессом было положено в основу разработки способа сварки и автоматического регулятора. Этот регулятор, помимо блоков поддержания на электродах $U_{эз} = const$, имеет систему устройств, позволяющих отсчитывать заданное время роста литого ядра ($t'_{сб}$), начиная с нулевого значения первой производной кривой сварочного тока, после чего процесс сварки прекращается.

Экспериментальная оценка и сравнение стабильности прочностных свойств соединений, получаемых при управляемом процессе по $U_{эз} = const$ и $t'_{сб} = const$ и при неуправляемом процессе, проводилась с использованием методов математической статистики. Так например, при испытании на отрыв образцов никеля толщиной $\delta = 0,15$ мм было установлено, что при введении автоматического управления среднее значение прочности увеличивается в 1,25 раза при одновременном снижении в 1,5 раза среднего квадратичного отклонения и в 1,9 раза коэффициента вариации. Проведенное сравнение дисперсий (по критерию F) и средних показателей прочности (по критерию t) показало, что улучшение статистических показателей качества является не случайным, а закономерным явлением. При этом было установлено, что вероятность получения соединений никеля с заданным показателем прочности для управляемого процесса составляет 98,48% против 80,66% для неуправляемого процесса. Эти данные свидетельствуют о значительном повышении стабильности качества соединений, что должно гарантировать их высокую эксплуатационную надежность.

Наиболее полно преимущество разработанного способа сварки, по сравнению с неуправляемым процессом, проявляются при воздействии возмущающих факторов, неизбежных в реальных производственных условиях.

Исследовался характер и степень отработки возмущений по начальному состоянию поверхности свариваемых деталей. Было установлено, что разработанная система управления гарантирует получение литого ядра достаточных размеров, отсутствие начальных и конечных выплесков металла при изменениях $R_{эз}$ в $\pm 3-10$ раз, за счет соответствующего изменения скорости нарастания сварочного тока, его величины и времени действия.

При исследовании отработки системы регулирования изменений усилия сжатия было установлено, что, хотя размеры литого ядра и прочность точек не остаются строго постоянными (диаметр и прочность точек растут с увеличением $R_{эз}$), управление процессом сварки по $U_{эз} = const$

и $t'_{cb} = const$ обеспечивает получение литого ядра достаточных размеров и отсутствие выплесков расплавленного металла при колебаниях $R_{сж}$ на $\pm 50\%$.

Для исследования влияния размеров контактной поверхности электродов на прочность точек, размеры литого ядра и характер протекания управляемого процесса сварки диаметр электрода изменялся на $\pm 30\%$. Из проведенных исследований видно, что компенсация возмущений по $d_{э}$ происходит, как и ранее, за счет соответствующего изменения геометрии импульса сварочного тока.

Детальное изучение вопроса отработки перечисленных возмущающих факторов показало, что отработка возмущения обеспечивается, поскольку управление процессом по выявленному параметру и найденному закону управления по $U_{ээ} = const$ и $t'_{cb} = const$ позволяет стабилизировать характер нагрева зоны сварки и гарантирует достижение и поддержание температуры плавления в зоне образования литого ядра.

Исследовался вопрос о регулировании размеров литого ядра и "жёсткости" режима сварки при управлении по $U_{ээ} = const$. Показано, что величина $U_{ээ}$ определяет степень "жёсткости" режима и размеры литого ядра, чем больше $U_{ээ}$, тем относительно более "жёсткий" режим сварки. Установлены допустимые пределы регулирования напряжения на электродах для нескольких типоразмеров свариваемых металлов.

Сформулированы и экспериментально подтверждены принципы определения необходимой величины падения напряжения на электродах при сварке разнотолщинных (с соотношением до 3:1) и разнородных металлов.

В результате проведенных исследований был разработан полупромышленный образец источника для сварки монтажных соединений навесных элементов радиоэлектронных устройств.

Опыт его эксплуатации и результаты эксплуатационных испытаний получаемых сварных соединений показали, что разработанный способ сварки с автоматическим управлением параметрами режима позволяет получать соединения с высокой стабильностью качества, отвечающие предъявляемым требованиям.

В настоящее время разработанный источник используется при монтаже реальных изделий.

ВЫВОДЫ

1. Точечные микросоединения, к которым предъявляются повышенные требования в отношении стабильности размеров литого ядра и отсутствия выплесков расплавленного металла, могут успешно свариваться конденсаторной сваркой на машинах, оснащенных устройствами для автоматического поддержания на заданном уровне мгновенных значений напряжения на

14.

электродах и стабилизацией длительности стадии плавления.

2. Установлено, что для получения литого ядра определенных размеров и исключения выплесков расплавленного металла, при наличии практически неизбежных возмущающих факторов, необходимо выполнить два условия: а) обеспечить достижение на сварочном контакте напряжения плавления при сварке; б) обеспечить заданную длительность стадии роста литого ядра при непрерывном поддержании на сварочном контакте постоянного значения напряжения плавления для данного сочетания металлов.

3. Расчет напряжения контактного плавления, применительно к конденсаторной точечной сварке, может быть выполнен на основе использования уравнения Кольрауша, устанавливающего соотношение между напряжением на контакте и температурой его перегрева. Для этого в уравнение (2) нужно подставить температуру, определяемую по известным методам, на расстоянии половины толщины деталей к моменту достижения в контакте температуры плавления.

4. Экспериментально установлено и подтверждено расчетом, что напряжение контактного плавления при сварке зависит от теплофизических свойств свариваемых металлов, толщины деталей и скорости нарастания сварочного тока.

Для некоторых типо-размеров точечных соединений напряжение на сварочном контакте и на электродах составляют (средние значения): для никеля толщиной от 0,1 до 0,3 мм $U_{гг} = 0,3 \pm 0,4 В$, $U_{дд} = 0,65 \pm 1,0 В$; для стали IX18N9T толщиной от 0,1 до 0,3 мм $U_{гг} = 0,35 \pm 0,47 В$, $U_{дд} = 1,0 \pm 1,25 В$; для латуни Л62 толщиной от 0,1 до 0,2 мм $U_{гг} = 0,15 \pm 0,22 В$, $U_{дд} = 0,45 \pm 0,55 В$; для кобальта 29НК толщиной от 0,1 до 0,2 мм $U_{гг} = 0,35 \pm 0,4 В$, $U_{дд} = 1,0 \pm 1,2 В$.

5. Разработан способ конденсаторной точечной сварки деталей толщиной от 0,1 до 0,8 мм с непрерывным поддержанием на электродах постоянного мгновенного значения напряжения и с отсчётом длительности стадии роста литого ядра с момента достижения первой производной кривой сварочного тока нулевого значения. Для осуществления этого способа сварки разработан автоматический регулятор.

Эксплуатационные испытания способа и автоматического регулятора по сварке образцов и деталей из никеля, латуни, кобальта, нержавеющей стали и других материалов толщиной от 0,1 до 0,8 мм показали, что созданная аппаратура позволяет исключить появление выплесков и полностью устранить непровар при колебаниях начального сопротивления междуэлектродной области в $\pm 3-10$ раз, усилия сжатия на $\pm 50\%$, диаметра рабочей поверхности электрода на $\pm 30\%$

6. Сравнительная оценка качества сварных соединений показала,

что при введении управления стабильность прочностных показателей возрастает до 98% по сравнению с 80–93% при неуправляемом процессе.

7. На основе опытно-промышленного внедрения разработанного оборудования установлена целесообразность его использования для сварки монтажных соединений радиоэлектронной аппаратуры.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Исаев А.П., Атаманов В.Н., Каганов Н.Л. Конденсаторная сварка деталей проволочных резисторов типа ПЭВ. В сб.МВТУ "Технология и автоматизация процессов сварки и пайки". Машиностроение, 1969г.
2. Атаманов В.Н., Исаев А.П., Каганов Н.Л. Разработка метода активного контроля конденсаторной сварки проводников с металлическими пленками микроселектронной аппаратуры. В сб.МВТУ "Технология и автоматизация процессов сварки и пайки". Машиностроение, 1969г.
3. Атаманов В.Н., Исаев А.П. Исследование процесса сварки с микрозазором при автоматическом слежении за стадией плавления. "Приборы и системы управления", №6, 1970г.
4. Атаманов В.Н., Бицоев Г.Д., Исаев А.П. Разработка оборудования и технологии для приваривания выводов интегральных схем к печатным платам. "Приборы и системы управления", №10, 1970г.
5. Атаманов В.Н., Каганов Н.Л., Березиенко В.П. и Исаев А.П. Система автоматического регулирования процесса контурной сварки. Известия ВУЗов, №7, 1972г.
6. Каганов Н.Л., Исаев А.П., Дряггин Г.Н. и Серов К.Н. Конденсаторная машина для точечной сварки. Авторское свидетельство №197795.
7. Атаманов В.Н., Бицоев Г.Д., Исаев А.П. и Шмырев В.П. Конденсаторная сварочная машина. Авторское свидетельство № 301878.
8. Атаманов В.Н., Исаев А.П., Грищенко В.Г., Аксенов В.Ф. и Шмырев В.П. Источник питания для конденсаторной сварки. Авторское свидетельство № 414069.