

Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта

Часть 5. Обнаружение дефектов микросварки в контактах элементов ЭКБ с помощью электромагнитных устройств

Илья ГРАФОВ, инженер лаборатории роботизации, АО «ЦКБ «Дейтон»
Дарья ДОРМИДОШИНА, заместитель генерального директора, АО «ЦКБ «Дейтон»
Юрий ЕВСТИФЕЕВ, к.т.н., старший научный сотрудник, профессор, АО «ЦКБ «Дейтон», medved55@mail.ru
Юрий РУБЦОВ, генеральный директор, главный конструктор, АО «ЦКБ «Дейтон»
Сергей СТАРОСТИН, к.т.н., начальник отдела, АО «Элеконд»

В части 1 этой статьи (см. ЭК2, 2025 г.) описаны методы и способы настройки изображений для видимого диапазона обнаружения дефектов с помощью автоматизированного программно-аппаратного комплекса (АПАК). В части 2 (см. ЭК3, 2025 г.) рассмотрены методы измерения, классификации и формирования базы данных (БД) дефектов с помощью АПАК для поиска дефектов изделий электронной техники (ИЭТ) с сохранением изображения дефекта в БД для дальнейшего применения. В части 3 (см. ЭК4, 2025 г.) описано обнаружение дефектов полупроводниковых пластин в поляризованном свете. В части 5 рассматривается поиск дефектов микросварки с помощью электромагнитных устройств.

В следующих частях статьи описываются функции автоматического опознавания дефектов, требования к устройствам компьютерного зрения, система управления роботизированными устройствами АПАК, примеры внедрения в производство из практики исследований, разработки и эксплуатации на заводах-изготовителях ИЭТ и перспективы развития АПАК.

Введение

Технологии сварки постоянно развиваются и способствуют постоянному созданию новых направлений, одним из которых является микросварка. Хотя она выполняется в гораздо меньших масштабах, чем традиционная сварка, сам процесс мало чем отличается. Этот вид сварки чрезвычайно популярен в электронной промышленности [1].

Микросварка – метод соединения микроскопических элементов, размеры которых могут измеряться микронами. Этот сложный метод сварки требует точного соблюдения технологий [2]. Еще одной характеристикой, которая отличает этот процесс от его более масштабного аналога, является количество необходимого тепла: в микросварке элементов изделий электронной компонентной базы (ЭКБ) оно значительно меньше.

Микросварка элементов изделий ЭКБ выполняется несколькими способами. Наиболее широко применяемые из них:

- лазерная микросварка: соединение элементов с помощью энергии лазерного луча. Имеет значительные преимущества перед дру-

гими методами микросварки. В большинстве случаев нет необходимости использовать дополнительные материалы и газы для получения хорошего и прочного сварного шва. Передаваемое в материалы тепло мало и очень локализованное, что оказывает минимальное тепловое воздействие и, следовательно, приводит к минимальной деформации элементов;

- TIG-микросварка (tungsten inert gas – вольфрамовый инертный газ): импульсная дуговая сварка, при которой для создания дуги, образующей сварной шов, используется тугоплавкий вольфрамовый электрод. TIG-микросварка представляет собой бесконтактный процесс, который, как и лазерная микросварка, требует внешних приспособлений. TIG-микросварка использует источник постоянного тока и обеспечивает сварные швы с минимальными зонами термического воздействия путем создания дуги между элементом микросварки и вольфрамовым электродом с использованием полученного тепла для создания соединения;
- микросварка оплавлением: используется для создания соединений с помощью высокого давления. В этой технологии элементы

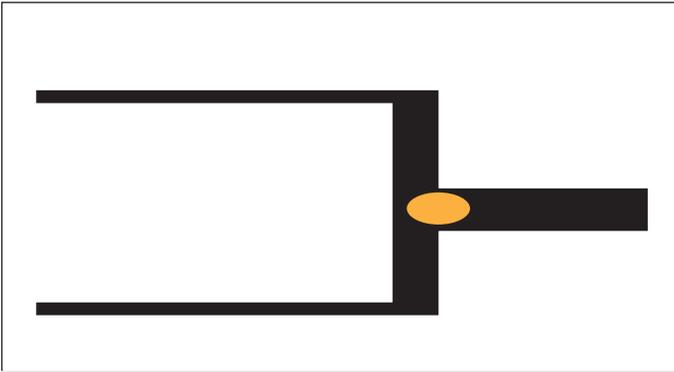


Рис. 1. Идеальный вариант соединения корпуса конденсатора с контактом к нему с помощью микросварки сопротивлением

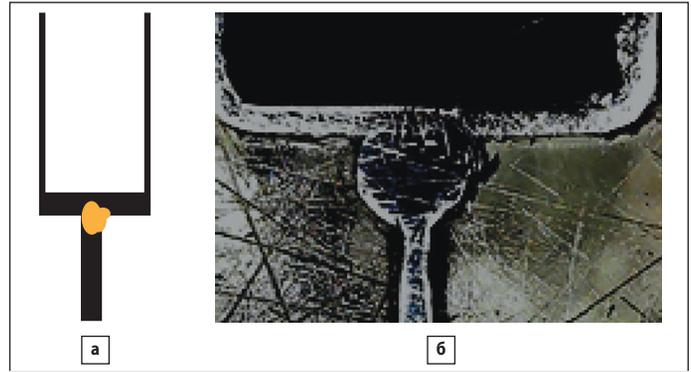


Рис. 2. а) демонстрация; б) рентгенограмма дефекта в соединении корпуса конденсатора с контактом к нему в виде выплеска

сварки соединяются путем плотного прижима друг к другу при определенной температуре;

- микросварка сопротивлением: элементы свариваются с помощью тока при плотном сжатии их между электродами. При этом микросварка происходит с нагревом контакта до состояния пластичности. Благодаря природе процесса имеется возможность контролировать несколько факторов: например, динамическое значение сопротивления, которое определяется путем измерения тока и напряжения, а также смещение сварочных электродов и вмятины, возникающие после микросварки. Эти характеристики микросварки сопротивлением можно контролировать с помощью камер, датчиков LVDT (Linear Variable Differential Transformer – дифференциальный трансформатор для измерения линейных перемещений), методов глубокого машинного обучения и использовать для оценки качества микросварки [3]. В этой статье представлены отечественные и зарубежные разработки методов контроля над качеством микросварки сопротивлением и наши разработки для их обеспечения.

Визуализация (анализ) образования брака при микросварке сопротивлением

В микросварке сопротивлением высококачественные сварные соединения получаются за счет согласования профилей сварочного тока и усилий сжатия электродов. Выделяющееся тепло в зоне сварки поднимается и достигает температуры плавления, создавая сварное соединение. Сварка этого вида широко применяется в электронике и приборостроении благодаря своей простоте и дешевизне. Однако миниатюризация в областях применения микросварки требует постоянного улучшения качества соединений. При серийном производстве изделий ЭКБ, имеющих одинаковые сварные соединения, необходимо в максимальной мере обеспечивать их идентичные параметры [4] – соединения должны быть максимально подобными. В идеальном варианте соединение корпуса конденсатора и контакта к нему с помощью микросварки сопротивлением показано на рис. 1.

Распространенными дефектами микросварки сопротивлением являются:

- 1) выплески (рис. 2), которые относятся к наружным дефектам; при этом образуются полости, кратеры и поры, которые не обеспечивают должной прочности соединения;
- 2) прожоги (рис. 3), которые относятся к сквозным дефектам. Они нарушают прочность соединений и герметичность будущего изделия;
- 3) непровары (рис. 4), которые относятся к внутренним дефектам. Они образуются в результате неполного расплавления металла элементов. Непровары не обеспечивают должной прочности соединения. Ко внутренним дефектам сварных швов также относятся: пористые образования, чужеродные (шлаковые) включения, трещины, участки с несплавленными сегментами.

Перечисленные выше дефекты возникают, если сварочный ток или усилие сжатия электродов не соответствуют электрофизическим процессам в сварном контакте. Причиной дефектов также могут быть:

- загрязнение электродов, несвоевременная их чистка;
 - загрязнение элементов микросварки.
- Профили тока и усилий сжатия электродов с учетом конкретных условий микросварки также определяются материалами и геометрическими размерами свариваемых элементов. При этом возникает негерметичность соединения, и в точке сварки сосредотачиваются внутренние напряжения, что ведет к трещинам в месте соединения (данный недостаток устраняется описанными ниже технологическими приемами [5]).

Управление током микросварки сопротивлением

Некоторые распространенные профили тока сварки представлены на рис. 5. В зависимости от конкретных задач сварки используются импульсы постоянного (рис. 5а–в) или переменного тока (рис. 5г). Простые импульсы постоянного тока (см. рис. 5а) применяются, если

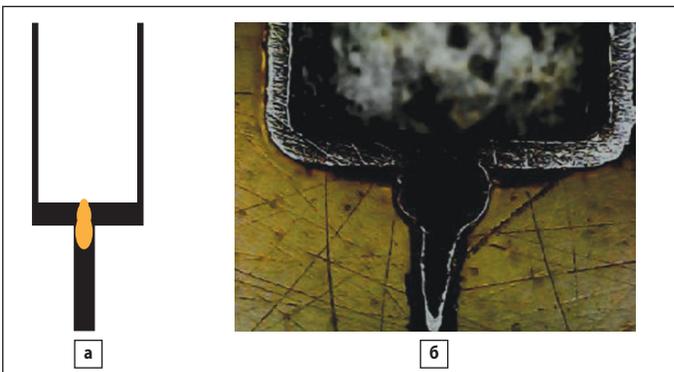


Рис. 3. а) демонстрация; б) рентгенограмма дефекта в соединении корпуса конденсатора с контактом к нему в виде прожога

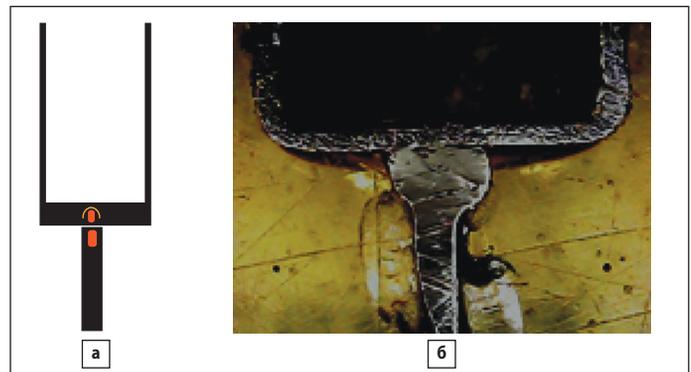


Рис. 4. а) демонстрация; б) рентгенограмма дефекта соединения корпуса конденсатора с контактом к нему в виде непровара

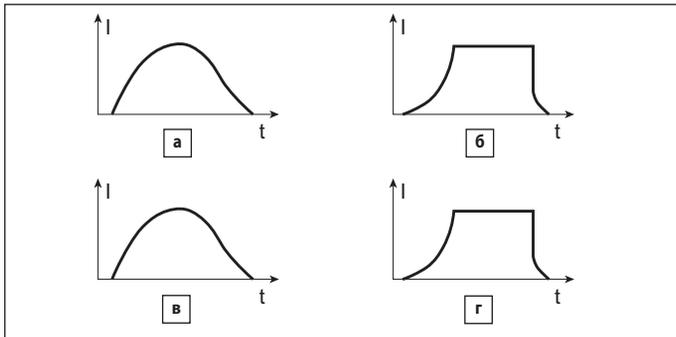


Рис. 5. Импульсы тока при выполнении микросварки

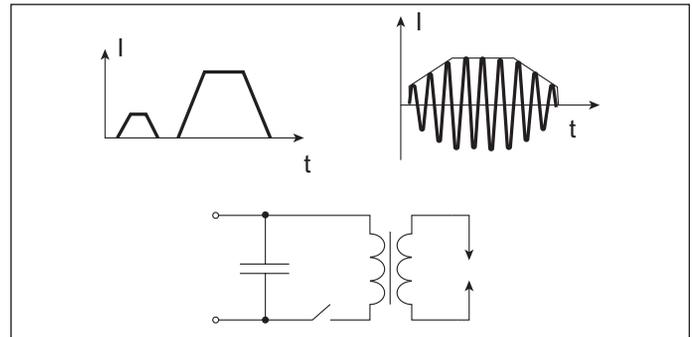


Рис. 6. Схема электрической части сварочного аппарата для простого импульса постоянного тока

требования к сварным соединениям не очень жесткие [6]. Их формируют конденсаторные разрядные микроточечные сварочные машины.

Схема электрической части машины этого типа показана на рис. 6. При замыкании ключа конденсатор разряжается в сварочную цепь и обеспечивает ток, усиленный трансформатором.

Для высококачественных сварочных соединений используются более сложные системы формирования импульсов с контролируемыми фронтами подъемов и спадов (рис. 5б–г) [7].

Сварочные импульсы переменного тока (рис. 5г) формируются с помощью инверторных сварочных аппаратов. Схема электрической части аппарата такого типа представлена на рис. 7. В качестве преобразователей тока используются тиристоры или транзисторы. Микросварка переменным током применяется для соединения элементов из тугоплавких металлов. Этот метод хорошо справляется с оксидными пленками на поверхности металлов и даже на алюминии.

Сварочные импульсы постоянного тока с управляемыми фронтами (рис. 5б–в) формируются, как правило, сварочными аппаратами на основе транзисторных преобразователей. Схемы электрических частей сварочных аппаратов на основе транзисторных преобразователей коммутационного типа приведены на рис. 8–9. Управляющие сигналы для транзисторов представляют собой последовательности прямоугольных импульсов, получаемых с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [8]. Параллельное соединение транзисторов обеспечивает необходимый ток сварки без трансформатора и уменьшает инерционность сварочной цепи.

Для проведения исследований принимаем показанный на рис. 5 в профиль тока как универсальный. Этот профиль описывается формулой (1):

$$a(t) = \begin{cases} x(t) \cdot \left(\frac{t}{t_1}\right)^n, & t \in \Delta t_1 \\ y(t), & t \in \Delta t_3, \\ z(t) \cdot \left(\frac{t_2 - t}{t_2}\right)^m, & t \in \Delta t_2 \end{cases} \quad (1)$$

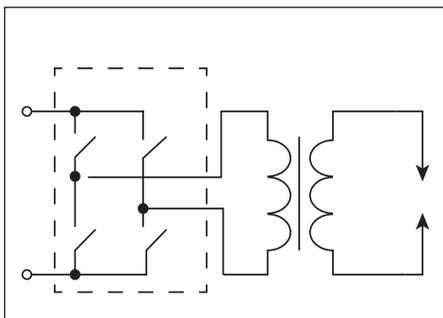


Рис. 7. Схема электрической части сварочного аппарата для импульса переменного тока

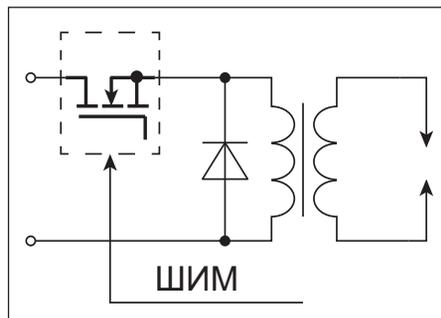


Рис. 8. Схема электрической части сварочного аппарата на основе транзисторного преобразователя коммутационного типа

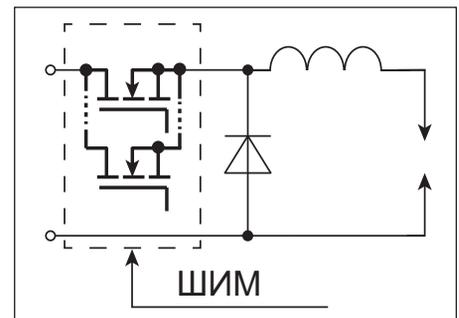


Рис. 9. Схема электрической части сварочного аппарата бестрансформаторного типа на основе транзисторного преобразователя коммутационного типа

где:

$a(t)$ – значение момента сварочного импульса тока, напряжения или мощности, соответственно ($i(t)$, $u(t)$, $p(t)$);

$x(t)$ – функция, описывающая нарастание сварочного импульса;

$y(t)$ – функция, описывающая установившуюся фазу импульса;

$z(t)$ – функция, описывающая спад сварочного импульса;

t_1 – время нарастания импульса;

t_2 – время спада импульса;

t_3 – время стабильной фазы импульса;

n , m – показатели мощности.

Изменение показателей мощности n и m (рис. 10) позволяет выбрать требуемые сварочные импульсы для свариваемых элементов из разных материалов и значений толщины.

Для наиболее точного регулирования силы тока предпочтительно использовать сварочный аппарат без трансформатора на основе транзисторного преобразователя, работающего в линейном режиме [9] (рис. 11).

Сила тока сварочного аппарата представляет собой сумму сил токов транзисторов. В зависимости от принципа управления транзисторами сварочный ток может формироваться разными способами.

Составляющие сварочного тока I (рис. 12) одинаковы и рассчитываются делением общей силы тока на число транзисторов (2):

$$I_k(t) = I(t)/n, \quad (2)$$

где n – количество параллельно включенных транзисторов; I_k – сила тока каждого транзистора ($k = 1, \dots, n$).

Показанный на рис. 12 способ формирования силы тока означает, что все транзисторы преобразователя начинают работать одновременно и работают одинаково.

Рис. 13 иллюстрирует другой способ формирования тока: транзисторы начинают работать один за другим и формируют свои части общего профиля тока.

Представленные на рис. 13 компоненты тока рассчитываются следующим образом (3):

$$I_k(t) = I(t) - (k - 1) \cdot I_{\text{макс}} \quad (3)$$

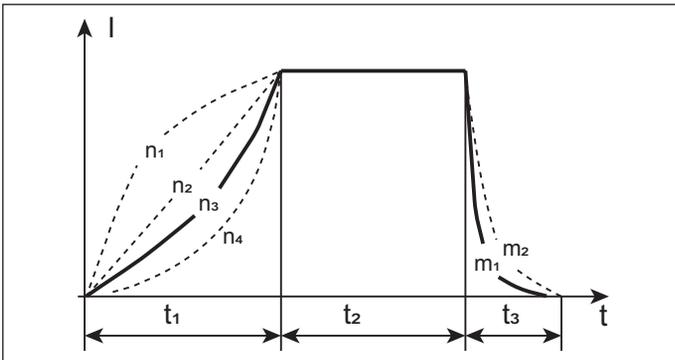


Рис. 10. Фазы изменения сварочного тока

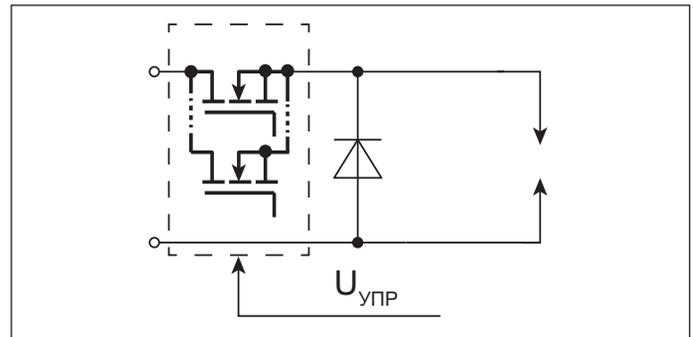


Рис. 11. Схема электрической части сварочного аппарата без трансформатора на основе транзисторного преобразователя коммутационного типа, работающего в линейном режиме

где $I_{\text{макс}}$ – максимальный ток каждого последовательно включаемого транзистора.

Для повышения энергоэффективности преобразователя может применяться комбинированный режим управления транзисторами: более важные интервалы профиля тока контролируются в линейном режиме, а остальные – в ключевом. Комбинированный режим управления можно реализовать с помощью многоячейчного преобразователя. Каждая его ячейка должна иметь два транзистора: один, работающий в линейном режиме (на который подается управляющее напряжение U_1), а другой – в ключевом (управляющее напряжение U_2) (рис. 14).

Управление усилиями сварочных электродов

В условиях наших исследований и разработок электродами являются устройства, удерживающие привариваемые основания корпусов конденсаторов к контактам. На рис. 15 показан распространенный профиль усилия сжатия сварочных электродов. Такой профиль применяется, когда точность сварных соединений не так важна, как их прочность [10].

Профили на рис. 16–18 больше подходят для высококачественной точной сварки.

Фазы усилий сварочного аппарата поясняются на рис. 19. Сначала осуществляется сильное сжатие электродов для разрушения оксид-

ных пленок на поверхностях свариваемых элементов (фаза предварительной обработки – t_1). После этого усилие уменьшается до нормального значения и удерживается на стабильном уровне в течение всего времени сварки (фаза сварки – t_2). Наконец, усилие увеличивается для обеспечения кристаллизации металла внутри свариваемого контакта («ковка» – t_3).

Возможность управления профилем усилия, величиной и длительностью фаз очень важна для качественной сварки. Возможность точного управления усилием напрямую определяется следующими типами приводов, используемых для сжатия сварочных электродов:

- механический;
- электромеханический;
- пневматический;
- гидравлический.

Механический привод является самым простым (обычно это пружина), но он не управляется. Пневматические и гидравлические приводы способны обеспечить высокое усилие сжатия сварочных электродов, но они инерционны и потому не позволяют точно управлять профилем усилия.

Электромеханический привод является управляемым и минимально инерционным по сравнению с приводами других типов и потому его можно считать наиболее предпочтительным. Оценка силы сжатия электродами может осуществляться за счет электромагнитного поля.

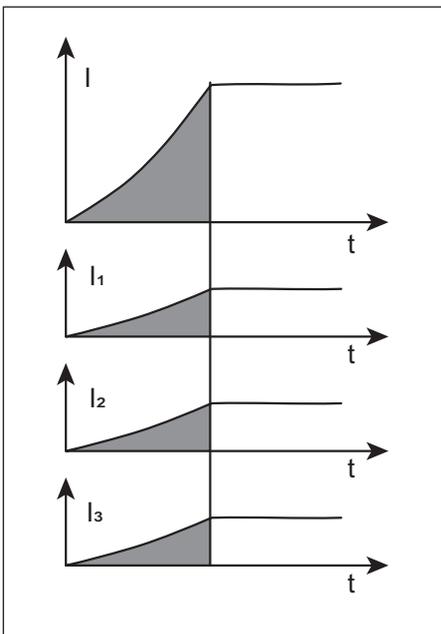


Рис. 12. Составляющие силы сварочного тока одинаковы и рассчитываются делением величины общей силы тока на число транзисторов

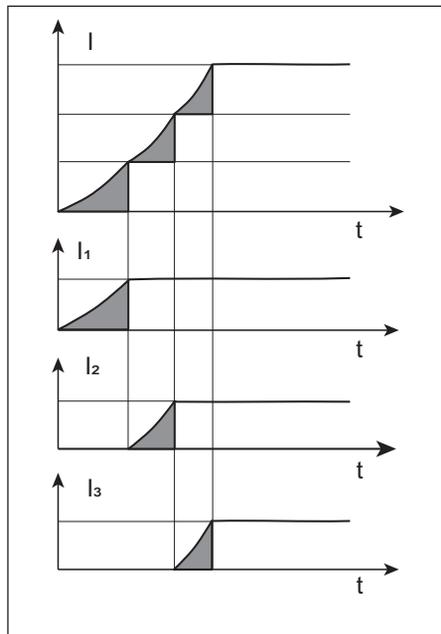


Рис. 13. Формирование тока каждым последовательно включаемым транзистором

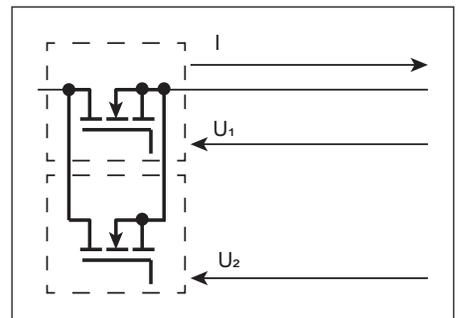


Рис. 14. Схема электрической части преобразователя сварочного аппарата на двух транзисторах

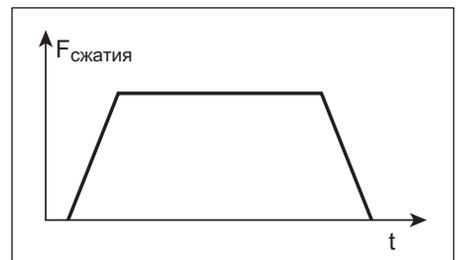


Рис. 15. Профиль сжатия, когда точность сварных соединений не так важна, как их прочность

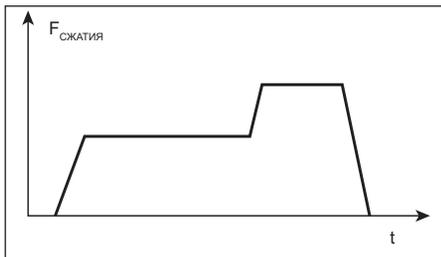


Рис. 16. Профиль сжатия, применяется для высококачественной точной сварки

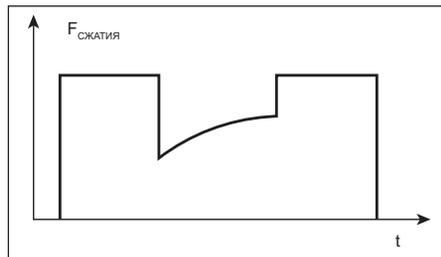


Рис. 17. Профиль сжатия, применяемый с учетом характера электрофизических процессов в сварном соединении

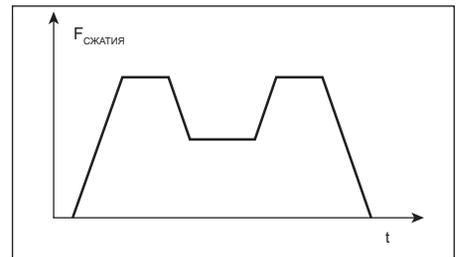


Рис. 18. Профиль сжатия, когда характер электрофизических процессов в сварном соединении является основным критерием

Комплексное управление током сварки и силой сжатия электродов

Наилучшие результаты достигаются, если профили силы тока и усилий сжатия электродов точно скоординированы друг с другом. Примеры управления профилями тока и силой сжатия электродов сварки представлены на рис. 20–21.

Управление током сварки и силой сжатия электродов выполняется следующим образом: на начальном этапе предварительной обработки, когда сила сжатия электродов велика, ток мал, он только предварительно нагревает зону сварки. На основном этапе сварки, когда сила уменьшается и стабилизируется, ток увеличивается в соответствии с профилем. На заключительном этапе сила снова возрастает, ток прекращается (ковка) [11].

Совершенствование аппарата микросварки с использованием системы настройки параметров

Согласование профилей тока и силы сжатия электродов для микросварки необходимы. Однако проблема микросварки заключается в ее очень малой длительности. Инерционность узлов сварочного аппарата не позволяет точно согласовать профили тока и силы. Решение проблемы видится в минимизации инерционности всех электрических и механических узлов сварочного аппарата. Общая инерционность системы определяется суммой постоянных времени узлов (4):

$$\tau = \sum_{i=1}^n \tau_i \quad (4)$$

Постоянная времени определяет время процесса, через которое его параметр изменится в e раз ($e \approx 2,718$).

Сварочный аппарат включает в себя следующие основные узлы:

- накопитель энергии;
- блок преобразователя;
- механический блок;
- систему управления. Таким образом, постоянная времени микросварки определяется следующим образом (5):

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4, \quad (5)$$

где:

- τ_1 – постоянная времени накопителя энергии;
- τ_2 – постоянная времени блока преобразователя;
- τ_3 – постоянная времени механического блока;
- τ_4 – постоянная времени системы управления.

Минимизация общей инерционности достигается за счет использования быстродействующих полупроводниковых приборов, современных быстрых и точных датчиков и исполнительных механизмов.

Рассмотрим некоторые способы минимизации электрической и механической инерционности в сварочном аппарате. Для уменьшения инерционности подачи энергии в нагрузку накопитель энергии выполняется в виде комбинации аккумуляторной батареи и конденсатора. Эквивалентная схема комбинированного накопителя энергии представлена на рис. 22. На этом рисунке приняты следующие обозначения: 1 – батарея; V – напряжение ненагруженной батареи; R_1 – сопротивление электролита батареи; C_1 – эквивалентная емкость батареи; L_1 – эквивалентная последовательная индуктивность батареи; R_2 – эквивалентное последовательное сопротивление батареи; 2 – конденсатор; L_2 – эквивалентная последовательная индуктивность конденсатора; C_3 – эквивалентная последовательная емкость конденсатора; R_3 – эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора.

Сочетание батареи и конденсатора обеспечивает высокую емкость и быструю отдачу энергии. Диаграмма разрядного тока представлена на рис. 23. Сначала конденсатор быстро отдает энергию нагрузке, а затем батарея отдает ток.

Электрическая постоянная времени комбинированного накопителя энергии τ_1 (рис. 23), в основном, зависит от параметров электролитического конденсатора C_2, L_2, R_3 . Она может составлять несколько микросекунд. Блок преобразователя должен включать два преобразователя: сварочного тока и тока усилий на электроды. Сварочный ток нагревает контактную зону свариваемых деталей, а ток усилий перемещает электроды. Для минимизации электрической инерции оба преобразователя могут быть построены на МОП-транзисторах, соединенных параллельно и работающих в линейном режиме (см. рис. 11). В этом случае инерционность блока преобразователя зависит только от параметров МОП-транзисторов. Эквивалентная

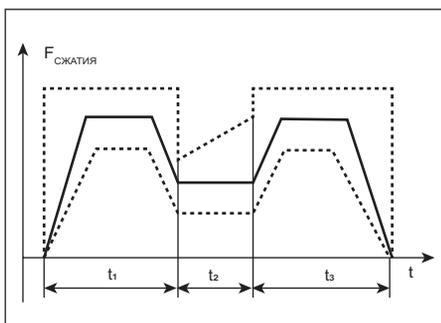


Рис. 19. Фазы приложения усилия сварки (сжатия электродов)

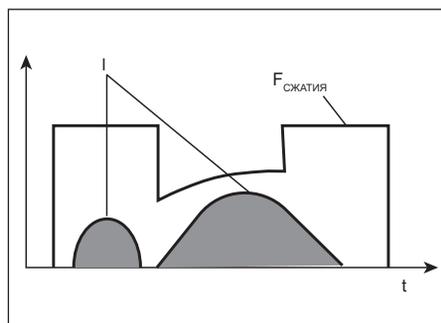


Рис. 20. Пример управления профилями тока и сжатия электродов сварки, когда учитывается характер электрофизических процессов в сварном соединении

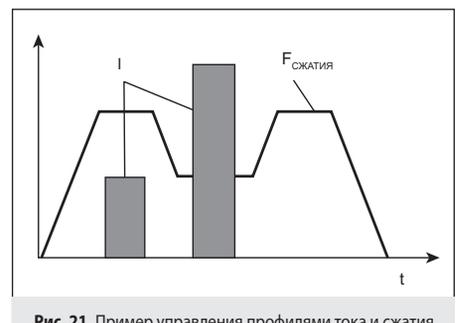


Рис. 21. Пример управления профилями тока и сжатия электродов сварки, когда в наибольшей степени учитывается характер электрофизических процессов в сварном соединении

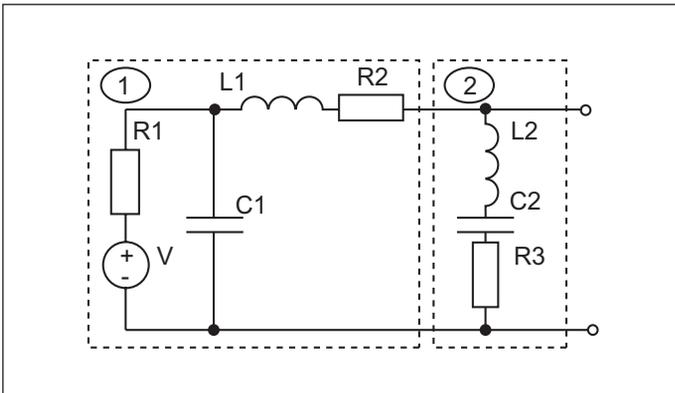


Рис. 22. Эквивалентная схема комбинированного накопителя энергии

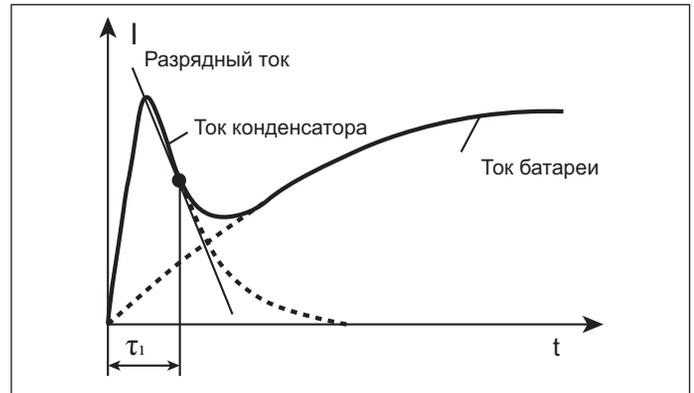


Рис. 23. Диаграмма разрядного тока

схема МОП-транзистора представлена на рис. 24. На этом рисунке приняты следующие обозначения: R1 – сопротивление затвора; C2 – входная емкость; V1 – управляющее напряжение V2 – напряжение затвор–исток; V3 – напряжение сток–исток.

Постоянная времени МОП-транзистора определяется параметрами R1 и C2. Современные МОП-транзисторы имеют чрезвычайно малую инерционность – от десятков до сотен наносекунд.

Механический блок сварочного аппарата включает в себя приводы и электроды. Для минимизации инерционности этого блока предпочтительны электромеханические приводы. Сжимающий ток проходит по приводам и вызывает их электромагнитное перемещение навстречу друг другу. Приводы, в свою очередь, перемещают сварочные электроды. Конструкция механического блока в общем виде представлена на рис. 25. Поскольку один привод перемещается за счет пружины, а другой неподвижен, сжимающий ток первого электрода должен преодолеть силу пружины.

Инерция электрической части механического блока пренебрежимо мала. Инерция пружины является важной составляющей общей инерции системы.

Постоянную времени пружины можно уменьшить до десятых долей миллисекунды. Система управления вырабатывает сигналы управления для блока преобразователя с целью определения токов сварки и сжатия. Любые необходимые профили тока могут быть получены с помощью микроконтроллера. Для точного согласования профилей тока и силы система должна иметь два автономных контура регулирования: контур регулирования сварочного тока и контур регулирования силы сжатия электродов [12]. Для быстрого регулирования тока может использоваться датчик Холла. Его инерция составляет около нескольких микросекунд. Регулирование силы сжатия электродов может осуществляться косвенно путем изменения смещения электродов. Для быстрого и точного регулирования смещений электродов может применяться микроэлектронная механическая система – устройство, объединяющее в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты. Это устройство способно обнаруживать очень малые сдвиги (десятки микрон) и характеризуется

очень малым временем реакции. С его помощью можно комплексно решить задачу настройки параметров.

Структура АПАК для обнаружения дефектов микросварки с помощью электромагнитных устройств

Разработанный АПАК имеет следующую аппаратно-программную структуру:

- компьютер с монитором;
- программное обеспечение с инструкциями по обработке информации;
- база данных;
- набор информации с описанием дефектов;
- камера-микроскоп;
- камера для съемки QR- и штрих-кодов;
- контроллер;
- датчик тока;
- датчик движения;
- устройство сброса.

Схема функционирования АПАК для обнаружения дефектов микросварки представлена на рис. 26.

Работа АПАК с базой данных, описанием дефектов и ПО представлена в предыдущей части этой статьи [13]. Ее авторы зарегистрировали результаты разработки алгоритмов и программ [14–16].

1. Компьютер подключен через контроллер к датчику тока, который имеет форму кольца, размыкается и надевается на силовую шину сварочного аппарата.

Способ измерения тока – бесконтактный по отношению к сварочному аппарату. Шина помещается в размыкающуюся сердцевину датчика. Гальваническая развязка обеспечивается за счет бесконтактного принципа измерения.

Прямая вставка измерительного шунта в цепь сварки нежелательна: хотя он мог бы дать пропорциональный току сигнал, шунт внес бы дополнительное сопротивление, снизил ток и выделил мощность, способную его повредить [17]. Таким образом, предпочтительными

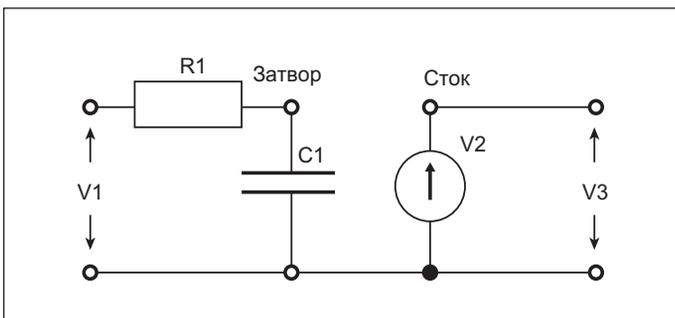


Рис. 24. Эквивалентная схема МОП-транзистора

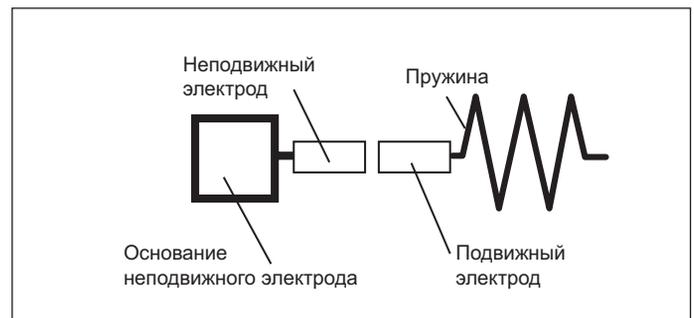


Рис. 25. Конструкция механического блока в общем виде

являются бесконтактные или низкоомные датчики, позволяющие измерять большой ток без существенного влияния на процесс сварки. В промышленной практике для измерения кратковременных токовых импульсов используются датчики двух основных типов: катушки Роговского и трансформаторы тока (ТТ).

Катушка Роговского представляет собой гибкий тороидальный датчик – виток провода, охватывающий шину сварочного аппарата. Принцип основан на законе электромагнитной индукции: протекающий через охваченный проводник переменный ток $I(t)$ создает переменное магнитное поле, которое наводит ЭДС в катушке, пропорциональную производной тока. Напряжение $u_{out}(t)$ на выходе катушки Роговского связано с изменением тока формулой (6):

$$u_{out}(t) = M \frac{dI(t)}{dt}, \quad (6)$$

где M – взаимная индуктивность между проводником и обмоткой.

Таким образом, сигнал с катушки Роговского соответствует дифференцированной форме сварочного тока. Для восстановления формы импульса тока выходной сигнал интегрируется. К катушке подключен электронный интегрирующий усилитель. В итоге получаемая после интегратора осциллограмма прямо пропорциональна протекающему току.

Главные преимущества катушки Роговского при измерении сверхкоротких импульсов:

- широкий частотный диапазон в силу отсутствия сердечника из ферромагнитного материала, благодаря чему отсутствуют ограничения по скорости нарастания тока из-за насыщения. Качественно измеряются быстрые переходные процессы, высокочастотные составляющие и одиночные импульсы вплоть до наносекундных фронтов;
- линейность и отсутствие насыщения – даже при больших сварочных токах выходной сигнал лишь зависит от производной тока по времени dI/dt , и насыщения не происходит.

Недостатки катушек Роговского тоже учитываются:

- выходной сигнал интегрируется, что требует специализированного усилителя или цифровой обработки. Интегратор может вносить ошибки и сам должен иметь широкую полосу пропускания;
- катушка не чувствительна к постоянному току – она улавливает лишь изменения тока. Для измерения длительных или постоянных токов катушку Роговского невозможно применять;

- катушка должна быть изготовлена с равномерной навивкой, иначе внешние магнитные помехи могут вносить наводки. Поскольку в условиях сварки возможны электромагнитные помехи от разряда, важны экранирование и корректное расположение катушки;
- величина ЭДС имеет малое значение, и потому интегратор должен иметь высокий коэффициент усиления и низкий шум.

Второй традиционный способ – трансформатор тока. По сути, это небольшой тороидальный трансформатор, первичной обмоткой которого служит сам проводник с током. Через кольцо пропущен провод или шина, образуя один виток первичной обмотки, а вторичная обмотка содержит большое число витков. При переменном токе в первичной обмотке во вторичной наводится ток, пропорциональный первичному, по закону трансформации:

$$I_{втор} = \frac{1}{N} I_{перв},$$

где N – число витков вторичной обмотки. Если ко вторичной обмотке подключен шунтирующий резистор, на нем возникает измеряемое напряжение согласно формуле (7):

$$U_{нагр} = I_{вт} R_{нагр} = \frac{I_{перв}}{N} R_{нагр}. \quad (7)$$

Таким образом, выбрав подходящие значения N и $R_{нагр}$, можно получить пропорциональный току сигнал.

Преимущество ТТ – прямой выходной сигнал, не требующий интегрирования. Он фактически выполняет функцию понижающего преобразователя тока. Например, 2000 А в первичной обмотке при $N = 1000$ превратятся во вторичной обмотке в 2 А, которые легко измерить. Трансформатор тока также с относительно простой конструкцией дает более высокий уровень выходного напряжения, чем катушка Роговского. Многие промышленные датчики тока для сварочных аппаратов – это именно ТТ благодаря их надежности и простоте подключения.

Однако для столь коротких одиночных импульсов у трансформатора тока имеются ограничения:

- в отличие от катушки Роговского, ТТ имеет сердечник из магнитопровода (феррит или сталь). Однонаправленный импульс тока намагничивает сердечник. Если за время импульса магнитный поток превысит уровень насыщения материала, трансформатор перестанет линейно передавать ток – выходной сигнал исказит-

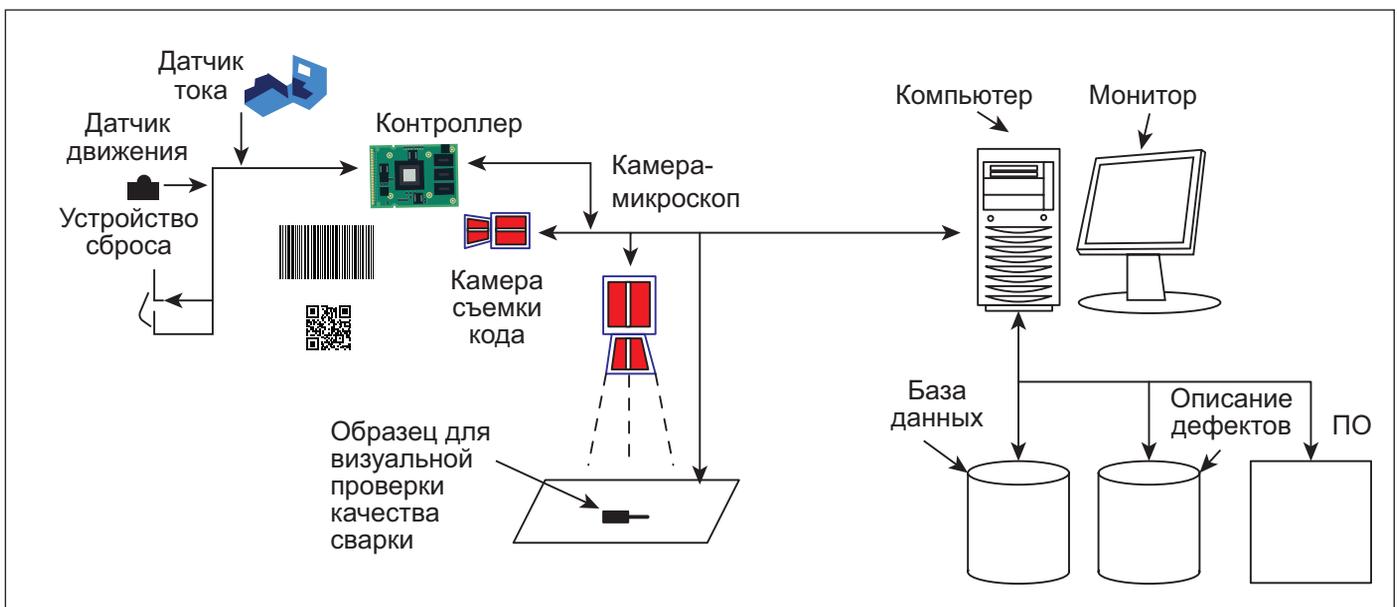


Рис. 26. Схема функционирования АПАК для обнаружения дефектов микросварки

ся. Короткий импульс (несколько мс) с большим амплитудным значением может насытить небольшой сердечник, особенно если в трансформаторе нет специального воздушного зазора или магнитного шунта для увеличения магнитной емкости. Таким образом, трансформаторы тока для импульсов требуют тщательного подбора материала сердечника и его размеров;

- ТТ – резонансная система с индуктивностью и емкостью, частотный отклик которой может быть ограничен десятками или сотнями килогерц. Короткие фронты, содержащие гармоники вплоть до МГц, могут частично сглаживаться из-за индуктивности рассеяния и эффектов вихревых токов в сердечнике. Однако для импульса длиной несколько мс основные частотные составляющие находятся в полосе до сотен кГц, подходящей для большинства ТТ;
- подобно катушке Роговского, идеальный ТТ реагирует только на изменение тока. Если после импульса остается постоянная или очень медленно меняющаяся составляющая, трансформатор ее не покажет.

С точки зрения точности и калибровки, оба метода в состоянии обеспечить приемлемую точность при правильной реализации. Катушка Роговского обычно калибруется по известному тестовому импульсу или синусоидальному току. ТТ проще откалибровать по синусоидальному току известной амплитуды, исходя из коэффициента трансформации. При правильном режиме ТТ дает очень линейную характеристику.

Полоса пропускания датчика – критический параметр. Для регистрации импульса длительностью, например, 5 мс с фронтом приблизительно 0,5 мс желателен датчик с полосой пропускания от десятка герц, чтобы ровно передать форму до постоянного значения в течение нескольких мс и до десятков или сотен кГц, чтобы передать резкий фронт и любые мелкие колебания. Катушки Роговского легко обеспечивают полосу от 1 Гц до нескольких МГц при правильном дизайне. ТТ могут ограничиваться снизу частотой порядка 100 Гц из-за индуктивности намагничивания и сверху, в зависимости от конструкции, десятками кГц или выше.

Возможны и другие датчики. Например, датчики на эффекте Холла. Они могут измерять и постоянную составляющую, но их полоса пропускания обычно ограничена сотнями кГц и точность страдает на очень кратковременных интервалах времени.

2. Датчик реагирует на импульс микросварки (магнитное поле) и передает сигнал на контроллер.

Контроллер содержит АЦП. Количество бит этого преобразователя определяет разрешение по амплитуде – на сколько дискретных уровней разбивается диапазон напряжений, подаваемых на вход. Например, 10-бит АЦП дает 1024 уровней квантования. Если опорное напряжение V_{ref} установлено, например, равным 5 В, минимальный шаг квантования приблизительно составляет 4,88 мВ. Для максимальной точности сигнала датчика необходимо масштабировать его амплитуду под диапазон АЦП. Например, если максимальный выход датчика после всех усилителей составляет около 2 В, лучше использовать меньшее опорное напряжение либо усилить сигнал приблизительно до 5 В амплитуды, чтобы задействовать весь диапазон АЦП. В противном случае эффективная разрядность будет ниже 10 бит.

Современные микроконтроллеры имеют 12- или 16-бит АЦП, что дает более тонкое разрешение: например, 12 бит (~4096 уровней) при том же диапазоне 5 В даст шаг ~1,22 мВ, позволяя точнее рассмотреть малые колебания тока.

Импульс длительностью несколько мс следует оцифровать с достаточным числом точек, чтобы восстановить его форму. Согласно теореме Найквиста, частота выборки должна быть как минимум вдвое выше максимальной частоты сигнала. Если фронт импульса равен 0,1–0,5 мс, значимые гармоники могут достигать нескольких или десятков кГц. У AVR-микроконтроллеров имеется встроенный 10-бит АЦП с максимальной скоростью около 15 тыс. выб./с при стандартных настройках, что дает около 67 мкс на отсчет. Однако можно увеличить скорость, уменьшив делитель частоты тактового сигнала АЦП. При максимальном такте около 1 МГц достигается около

77 тыс. выб./с, (примерно 13 мкс на выборку). Кроме того, можно воспользоваться режимом «свободного управления» (free-run), когда АЦП постоянно генерирует выборки максимально быстро, не ожидая команд от ядра.

Следует оптимально подобрать опорное напряжение АЦП под максимальный ожидаемый сигнал. Если датчик тока выдает сигнал 0–3 В, можно использовать внешний опорный источник 3,3 В или внутренний 2,56 В (для ATmega2560), что увеличит эффективную точность. Кроме того, следует добиться того, чтобы сигнал на АЦП не выходил за диапазон $0-V_{ref}$. Защитные делители или ограничители добавляются на случай, если импульс окажется больше расчетного.

Быстродействующие АЦП могут иметь ограничение по входному импедансу источника. Если перед АЦП установлена RC-цепь или фильтр, необходимо удостовериться, что источник способен зарядить входную емкость АЦП за короткое время, иначе форма может исказиться. С этой целью сигнал часто буферизуется операционным усилителем, особенно при высокоомных датчиках.

В контроллере можно настроить запуск оцифровки по таймеру или внешнему событию. Например, ATmega2560 позволяет привязать начало преобразования к срабатыванию таймера, что гарантирует равномерные интервалы между выборками. Если необходимо записать N точек с частотой 100 кГц, таймер настраивается на период 10 мкс, и по его событию запускается АЦП, а результаты отправляются в буфер.

3. Импульсная микросварка протекает в условиях наличия интенсивных электромагнитных полей. Без целого комплекса мер высокочастотные наводки способны исказить форму сигнала датчика и снизить достоверность контроля. В аппаратной части АПАК реализованы следующие наборы решений, позволяющие надежно измерять ток:
 - перед АЦП установлены RC-цепочки с граничной частотой выше полезного спектра, но ниже частот выбросов;
 - входы усилителей дополнительно защищены TVS-диодами, удерживающими всплески в расчетном диапазоне;
 - чувствительные узлы вынесены за пределы максимального магнитного поля.

После того как импульс сварочного тока оцифрован и получен массив данных, возникает задача выделения информативных параметров и устранения помех. Сырые данные могут содержать шум различной природы:

- высокочастотные наводки и электромагнитные помехи от разряда (например, радиочастотный всплеск при самом моменте искробразования);
- шум электронных компонентов датчика и АЦП (термический шум усилителей, квантование);
- постепенный дрейф нуля (особенно актуально, если использовался интегратор для катушки Роговского, – конденсатор интегратора может слегка зарядиться и сместить базовую линию).

Для улучшения качества сигнала применяются фильтрация и цифровая обработка. Применяется несколько следующих распространенных методов.

- *Скользящее среднее.* Этот простой метод выравнивает случайные флуктуации, усредняя каждый отсчет с соседними. Например, можно заменить каждый измеренный пункт средним из него самого и N ближайших соседей. Математически для окна шириной N это можно выразить как (8):

$$y[k] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[k-i], \quad (8)$$

где $x[k-i]$ – исходный сигнал; $y[k]$ – отфильтрованный.

Скользящее среднее – это фильтр с конечной импульсной характеристикой с равными коэффициентами. Он эффективно действует как низкочастотный фильтр, подавляя шум с частотой выше, чем $1/\Delta t$, где Δt – шаг дискретизации. Поскольку недостатком является размытие резких фронтов при слишком широком окне, N выбирается

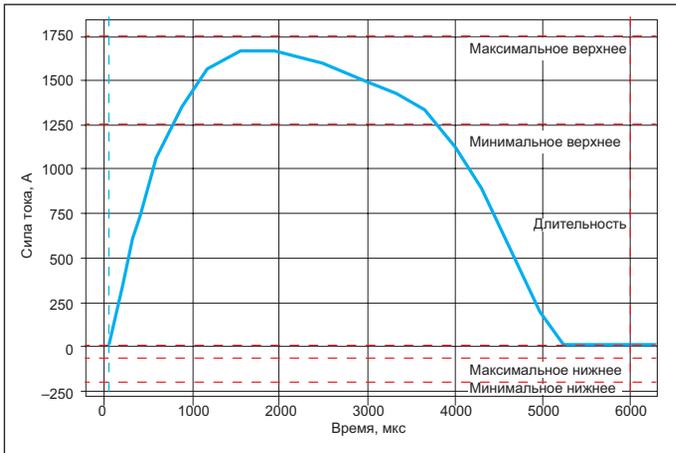


Рис. 27. Форма сигнала сварочного импульса

Рис. 28. Экранная форма для обеспечения работы АПАК

на основе компромисса. Достаточно, чтобы сгладить шум, не стерев характеристики импульса;

- **Цифровые фильтры КИХ/БИХ.** В более сложных случаях применяются фильтры с заданной частотной характеристикой. КИХ-фильтр позволяет точно настроить полосу пропускания, подавить, например, сетевые наводки или высокочастотный звон выше 100 кГц, сохранив форму основного импульса. Для получения коэффициентов можно использовать методы проектирования. БИХ-фильтры – цифровые аналоги RC- или RLC-фильтров. Часто для удаления очень высокочастотного шума достаточно ФНЧ 1-го порядка. Например, рекуррентная формула 1-го порядка (9):

$$y[k] = \alpha y[k-1] + (1-\alpha)x[k], \quad (9)$$

где коэффициент $0 < \alpha < 1$ определяется требуемой полосой. Если значение α близко к 1 – фильтр сильно сглаживает, но медленно реагирует, а если ближе к 0 – меньше сглаживает.

Для удаления дрейфа также применяются фильтры высоких частот. Если после импульса сигнал не возвращается точно к нулю, а имеет некую остаточную величину (дрейф), можно вычестить среднее значение до и после импульса либо пропустить сигнал через высокочастотный фильтр, отсекающий частоты ниже нескольких Гц, чтобы удалить постоянную составляющую и склон смещения, сделав базовую линию точно нулевой.

Для фильтрации и обработки импульсов можно использовать возможности самого контроллера.

4. Помимо фильтрации, для оцифрованных данных выполняется расчет ключевых параметров:

- а) $I_{\text{пик}}$ – максимальный ток импульса. Этот параметр напрямую связан с энергией и проплавлением;
 - б) $t_{\text{прод}}$ – длительность импульса по определенному критерию, например ширина импульса на половине максимума, что характеризует время поступления тепла;
- интегральные параметры – заряд (10):

$$Q = \int I(t) dt \quad (10)$$

и энергия (11):

$$W = \int R(t) I(t)^2 dt \quad (11)$$

Заряд пропорционален количеству расплавленного материала, а энергия – глубине прогрева. Если измерять только ток, можно использовать упрощенный показатель – амплитудно-временной импульс $I_{\text{пик}} \cdot t_{0,5}$ – произведение пикового тока на полуширину, или площадь под кривой тока;

- наличие колебаний: если после основного пика имеются колебания, их период $T_{\text{ос}}$ и затухание могут оказывать воздействие на паразитную индуктивность и емкость цепи.

Одним из сложных аспектов измерения импульсного тока является синхронизация начала оцифровки с началом импульса сварки. Если начать измерять слишком рано, можно захватить много лишних данных до события; если слишком поздно – можно пропустить фронт или даже весь импульс. Следовательно, синхронизация должна быть максимально точной вплоть до микросекунд.

Если микроконтроллер не управляет процессом, можно воспользоваться датчиком начала импульса. Поскольку ток очень велик, он создает магнитное поле – малый виток провода, надетый на провод сварочного тока, улавливает резкий скачок тока. Выход такого витка можно подать на компаратор. Когда ток превысит некоторый порог, компаратор выдаст цифровой сигнал. Этот сигнал запускает прерывание контроллера, в котором начинается сбор данных.

Другой подход – буферизация. Такой метод используется в осциллографах и может быть реализован на мощном контроллере. В память постоянно пишется информация. Размер буфера должен покрыть ожидание перед событием. Когда случается событие, запись прекращается, и в буфере остаются не только предыстория событий до импульса, но и собственно импульс. Например, буфер на 1000 точек при 100 кГц хранит 10 мс предыстории; если импульс произошел, сохранятся последние 2 мс «тишины» и 8 мс импульса.

От контроллера сигнал передается на компьютер, который преобразует полученный от МК сигнал и сравнивает его с шаблонами. Форма сигнала представлена на рис. 27.

В первой фазе разряда ток стремительно нарастает до максимума, ограниченного, в основном, совокупным сопротивлением цепи (включая сопротивление контактной точки сварки). Далее, если индуктивность в цепи мала и отсутствует значительный колебательный процесс, спад тока примерно описывается экспоненциальной зависимостью (12):

$$I(t) = I_{\text{пик}} \exp(-t/\tau), \quad (12)$$

где $\tau = R_{\text{общ}} C$; C – постоянная времени.

Форма импульса может вибрировать из-за индуктивности проводовников и динамического изменения сопротивления в зоне сварки. Тем не менее общее поведение – это короткий фронт и затухающая хвостовая часть импульса.

Энергия, выделяемая в одном импульсе, определяется емкостью и напряжением заряда конденсаторов. При идеальном разряде энергия E связана с напряжением V_0 соотношением (13):

$$E = \frac{1}{2} C_k V_0^2, \quad (13)$$

где C_k – суммарная емкость конденсаторов сварочного аппарата.

На практике не вся энергия участвует в нагреве точки сварки – часть рассеивается в проводниках и электродах. Небольшое изменение напряжения существенно меняет энергию импульса, что требует контроля.

Для обеспечения работы АПАК предварительно заполняется экранная форма исходными данными, которая представлена на рис. 28.

Партия свариваемых изделий идентифицируется с помощью ее номера, который может вводиться вручную или с помощью камеры ввода QR- (штрих-) кода. Выбор определяется документооборотом предприятия.

Далее в форму вводятся описанные выше параметры.

АПАК содержит камеру–микроскоп, позволяющую с помощью системы компьютерного зрения настраивать параметры [18–19] обнаружения, измерять их [20–21] и проверять дефекты микросварки по описанным выше признакам.

Выводы

Микросварка сопротивлением обладает рядом важных преимуществ перед традиционными способами: энергия выделяется чрезвычайно быстро (за считанные миллисекунды), что приводит к локальному нагреву, по большей части, в зоне сварки. Значительная часть энергии расходуется непосредственно на формирование сварной точки и меньшая – на нагрев окружающего материала. Зона термического влияния при правильной настройке минимальна, что особенно важно при сварке элементов изделий ЭКБ. Кроме того, за счет накопления энергии в конденсаторах перед каждым импульсом достигается высокая воспроизводимость: даже при колебаниях сетевого напряжения или помехах величина импульса остается стабильной, что обеспечивает воспроизводимое качество сварки.

Необходимым условием является быстрая реакция всех основных узлов процесса. Для минимизации их инерционности предложены технические решения. Предварительная оценка подтвердила, что предлагаемые решения способны обеспечить повышение точности управления профилями сварочного тока и усилия сжатия электродов.

Качество сварного соединения при импульсной сварке во многом определяется формой и параметрами импульса тока. Если энергия импульса слишком мала (низкая величина $I_{пик}$ или слишком короткая длительность), металл может не прогреться до точки плавления – возникает холодная сварка или неполное проплавление контакта [22]. Визуально такой дефект может не отличаться, но механическая прочность соединения будет низкой. С другой стороны, избыточная энергия приводит к перегреву и разбрызгиванию расплавленного металла, возможному повреждению окружающих областей или испарению материалов. Следовательно, важно контролировать импульс – оптимальный режим обеспечивает достаточное проплавление без термического повреждения. Этот контроль реализуется путем анализа сигнала тока с помощью АПАК во время каждого импульса сварки: сравнение измеренного тока с эталонными характеристиками позволяет судить о качестве образуемой точки и о процессе сварки. ■

Литература

- Worldwide Micro Welding Service Market Research Report 2025. Forecast to 2031. PW Consulting Agency. New York. USA. 2025.
- The Growth of Micro Welding. Philadelphia Technician Training Institute. Philadelphia. USA. 2022.
- Micro Welding Science. Aaron Astle. Sunstone Engineering LLC. Spanish Fork. USA. 2024.
- Mature Technology. New Dimensions. Matuschek MeЯtechnik GmbH. Alsdorf. Germany. 2024.
- Xiaoning Bo, Jin Wang, Honglan Li, Guoqin Li, Feng Lu. Machine Vision Based Defect Detection Method for Electronic Component. Department of Electrical Engineering. Taiyuan Institute of Technology. China. 2023.
- Jiaquan Zeng, Biao Cao, Ran Tian. Quality Monitoring for Micro Resistance Spot Welding with Class-Imbalanced Data Based on Anomaly Detection. School of Mechanical and Automotive Engineering. South China University of Technology. Guangzhou. China. 2020.
- Nikhil Kumar, Sugumaran Minda Ramakrishnan, Kailasanathan Panchapakesan, Devarajan Subramaniam, Iain Masters, Martin Dowson, Abhishek Das. In-Depth Evaluation of Micro-Resistance Spot Welding for Connecting Tab to 18650 Li-Ion Cells for Electric Vehicle Battery Application. Department of Mechanical Engineering. Indian Institute of Technology Delhi. India. 2023.
- Mostafa Hemmati, Mohammad Haeri. Control of Resistance Spot Welding Using Model Predictive Control. Master of Science in Control Engineering Islamic Azad University. Tehran. Iran. 2023.
- Nikhil Kumar, Sugumaran Minda Ramakrishnan, Abhishek Das. Utilising a novel multi-electrode approach for improving micro-resistance spot welding productivity for electric-mobility battery interconnects. University of Warwick. Coventry. UK. 2024.
- Young-Min Kim, Insung Hwang, Jason Cheon. Recent Research Trend of Resistance Spot Welding Quality Monitoring Technology in Korea. Advanced Joining & Additive Manufacturing R&D Department. Korea Institute of Industrial Technology. Incheon. Korea. 2023.
- Ziyad Kas, Manohar Das. Adaptive Control of Resistance Spot Welding Based on a Dynamic Resistance Model. Department of Electrical and Computer Engineering. Oakland University. Rochester. USA. 2019.
- Design and Implementation of a Medium Frequency Direct Current Resistance Spot Welding System Integrated with Welding Control Interface. Can Ozensoy. Murat Uyar. Bursa Uludag University. Department of Electrical-Electronics Engineering. Bursa. Turkiye. 2025.
- Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта Часть 3. Обнаружение дефектов полупроводниковых пластин в поляризованном свете // Электронные компоненты. №4. 2025.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа визуализации данных об изделиях электронной техники» №2023612746. 27.02.2023.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа формирования базы данных об изделиях электронной техники» № 2022683437. 05.12.2022
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа управления данными об изделиях электронной техники» №2022668891. 13.10.2022
- Quality Monitoring of Resistance Spot Welding Based on Process Parameters. Ru-xiong. Department of Mechanical and Electrical. Jingdezhen Ceramic Institute. China. 2012
- Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта Часть 1. Технические средства настройки изображений для обнаружения дефектов в видимом диапазоне // Электронные компоненты. №2. 2025.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа корректировки изображения для системы оценки контроля качества изделий электронной техники на базе компьютерного зрения» № 2024662887. 31.05.2024.
- Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта Часть 2. Измерение обнаруженных дефектов в видимом диапазоне // Электронные компоненты. №3. 2025.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа измерения микродефектов для системы оценки контроля качества изделий электронной техники с использованием технологий компьютерного зрения». № 2024664618. 26.06.2024.
- Panagiotis Stavropoulos, Kyriakos Sabatakakis. Quality Assurance in Resistance Spot Welding: State of Practice, State of the Art, and Prospects. Laboratory for Manufacturing Systems and Automation. Department of Mechanical Engineering and Aeronautics. University of Patras. Greece. 2024.