

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 621.77.01

doi:10.21685/2307-4205-2023-2-6

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МЕДИ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Д. В. Дерябин¹, Н. В. Горячев², Н. К. Юрков³

¹ Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

^{2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ niiemp@niiemp.ru, ² ra4foc@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Технология электромагнитных импульсов представляет собой бесконтактный импульсный процесс с большим потенциалом для соединения разнородных материалов. Этот метод использует импульсные электромагнитные поля для формирования и соединения металлов с высокой проводимостью, таких как алюминий или медь. Этот процесс позволяет выполнять соединения с геометрическим замыканием и с натягом за счет сжатия или расширения профильных структур сплавов с закрытым поперечным сечением, а также металлургических сварных швов. Несмотря на технологические преимущества и потенциал, было обнаружено лишь скромное внедрение в промышленное применение. Настоящая научная статья призвана раскрыть промышленный интерес и применимость технологии электромагнитных импульсов в различных подсекторах микроэлектронной промышленности, продвигая легкие и высокоточные инженерные компоненты. *Материалы и методы.* На основании численных и экспериментальных исследований электрические соединения медь–медь и медь–алюминий производятся методом электромагнитно-импульсной опрессовки. Определены основные параметры и проанализировано их влияние на процесс соединения и достижимую прочность соединения. Уделяется внимание разработке электромагнитных приводов. Применяются основы теории магнитной и импульсной сварки. *Результаты.* Даны выводы и указания по проектированию изготовления соединений по технологии электромагнитного импульса. Для численных исследований представлен упрощенный подход к моделированию. Этот несвязанный подход позволяет успешно разрабатывать процесс и конструкцию соединения для опрессовки электромагнитным импульсом. Указаны различные параметры сварки, обуславливающие разную морфологию поверхности, раздела с разной механической прочностью. Оценивается влияние поверхности оправки на качество соединения. *Выводы.* Экспериментально определены критерии свариваемости для соединений меди и алюминия. Оценивается влияние нескольких параметров процесса экспериментальной сварки, а именно: энергии разряда, зазоров и дырок с помощью разрушающих испытаний.

Ключевые слова: сварочное соединение, ударная сварка, электромагнитно-импульсная обжимка, магнитно-импульсная сварка, численное моделирование, проектирование соединений, формирование соединения

Для цитирования: Дерябин Д. В., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Технология обработки меди и медных сплавов электромагнитными импульсами // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 51–61. doi:10.21685/2307-4205-2023-2-6

PROCESSING OF COPPER AND METAL MELTS BY ELECTROMAGNETIC PULSES

D.V. Deryabin¹, N.V. Goryachev², N.K. Yurkov³

¹ Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia

^{2,3} Penza State University, Penza, Russia

¹ niiemp@niiemp.ru, ² ra4foc@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* Electromagnetic Pulse Technology (TEM) is a non-contact pulse process with great potential for connecting dissimilar materials. This method uses pulsed electromagnetic fields to form and connect metals with high conductivity, such as aluminum or copper. This process makes it possible to perform connections with geometric closure and tension due to compression or expansion of profile structures of alloys with a closed cross section, as well as metallurgical welds. Despite the technological advantages and potential, only a modest introduction into industrial applications has been found. This scientific article aims to reveal the industrial interest and applicability of electromagnetic pulse technology in various subsectors of the microelectronic industry, promoting lightweight and high-precision engineering components. *Materials and methods.* Based on numerical and experimental studies, copper-copper and copper-aluminum electrical connections are produced by electromagnetic pulse crimping. The main parameters are determined and their influence on the connection process and the achievable strength of the connection is analyzed. Attention is paid to the development of electromagnetic drives. The fundamentals of the theory of magnetic and pulsed welding are applied. *Results.* Conclusions and instructions on the design of the manufacture of compounds using electromagnetic pulse technology are given. A simplified approach to modeling is presented for numerical studies. This unrelated approach makes it possible to successfully develop the process and design of the connection for electromagnetic pulse crimping. Various welding parameters are indicated, which determine the different morphology of the surface, the section with different mechanical strength. The influence of the mandrel surface on the quality of the joint is evaluated. *Conclusions.* The weldability criteria for copper and aluminum compounds have been experimentally determined. The influence of several parameters of the experimental welding process, namely the discharge energy, gaps and holes, is evaluated using destructive tests.

Keywords: welding joint, impact welding, electromagnetic pulse crimping, magnetic pulse welding, numerical modeling, joint design, joint formation

For citation: Deryabin D.V., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Processing of copper and metal melts by electromagnetic pulses. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(2):51–61. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-2-6

Введение

В связи с повышенной тенденцией на высокоточную микроэлектронику необходимость в облегченных и обработанных конструкциях полупроводниковой техники особо актуальна. Разрабатываются новые системы материалов с улучшенными свойствами, уменьшенной толщиной и новыми комбинациями материалов, что приводит к значительным изменениям в сборочных операциях. Эффективные методы соединения необходимы для преодоления металлургической и термической несовместимости разнородных материалов, таких как медь, алюминий или алюминий–пластик, армированное волокно и т.д. Чтобы продемонстрировать возможности усовершенствованного процесса соединения/формования для преодоления трудностей, присущих комбинированию материалов разного типа и толщины, были изучены различные тематические исследования. В данной научной статье представлена всесторонняя теория о соединениях с натягом, геометрической посадкой и сварных соединениях, изготовленных с помощью технологии электромагнитных импульсов.

Технология электромагнитных импульсов (ТЕМИ) – это процесс с высокой скоростью деформации, который может быть гибким и экономичным дополнением или альтернативой обычному процессу листовой формовки или соединения металлов/сплавов. Этот бесконтактный метод использует импульсные магнитные поля для приложения сил к металлической заготовке, предпочтительно изготовленной из материала с высокой электропроводностью [1]. Принцип основан на физических эффектах, описанных Максвеллом, т.е. на временном изменении магнитного поля. Поле индуцирует электрические токи в близлежащих проводниках и дополнительно воздействует на эти проводники силой Лоренца (сила взаимодействия электромагнитного поля на заряженную частицу) (рис. 1) [2].

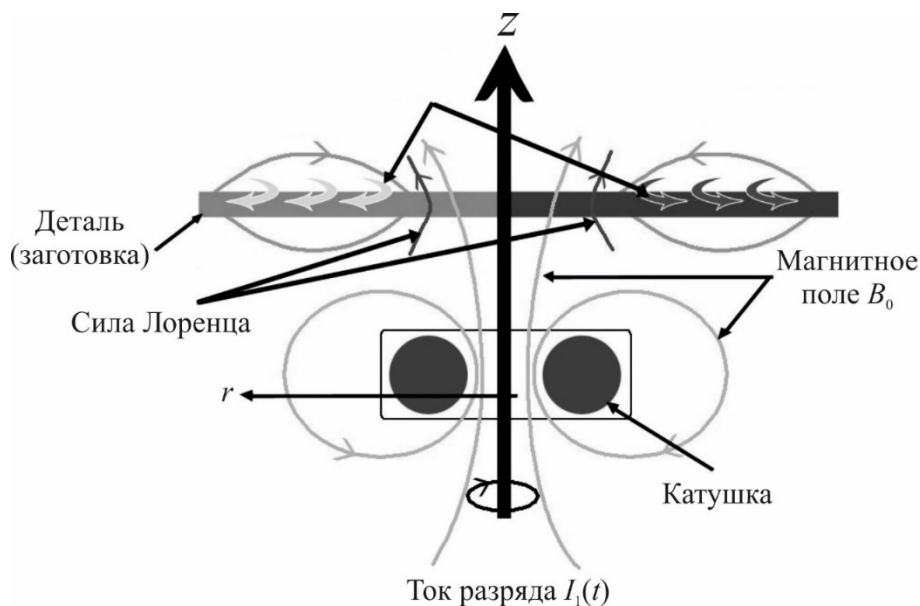


Рис. 1. Распространение силы Лоренца в пространстве

Энергия, необходимая для процесса, накапливается в конденсаторной батарее (с полной емкостью C), заряженной при начальном напряжении V_0 . Затем эта энергия разряжается в виде тока $I(t)$, что течет через катушку (плоскую спираль, винтовую и т.д.) с использованием высокоскоростных переключающих игнитронов. В результате этого разряда тока, который представляет собой сильно затухающую синусоидальную волну, нестационарное магнитное поле B_0 производится в катушке, которая проникает в заготовку, расположенную вблизи катушки. Это переходное магнитное поле B_0 индуцирует вихревые токи в заготовке, которые ограничивают проникновение магнитного поля B_0 в заготовку и для создания собственного наведенного магнитного поля в направлении, противоположном генерируемому в катушке B_0 . Отталкивающие магнитные поля B_0 и B_1 взаимодействуют между собой, в результате чего на заготовку действуют объемные силы, называемые силами Лоренца. Эти силы создают магнитное давление на заготовку. Если это магнитное давление выше, чем предел текучести заготовки, происходит динамическая деформация заготовки [3]. Деформацию заготовки можно оценить с помощью процесса формирования электромагнитных импульсов.

Формирование электромагнитных импульсов (ФЭИ) – это процесс, при котором преобразование заготовки является результатом действия сил Лоренца на деталь, следствием отталкивающего взаимодействия между нестационарным магнитным полем, создаваемым в катушке переходными токами, и магнитным полем, создаваемым в изделии. В зависимости от силы электромагнитного поля может использоваться ТЕМИ.

Далее рассмотрим основные технологические операции на основе ФЭИ.

Основные технологические операции с применением ФЭИ

Электромагнитная импульсная резка (ЭИР) – это процесс, который отличается от обычных процессов резки; при электромагнитно-импульсной резке заготовка не обрезается между двумя механическими инструментами. Текущий индуктор заменяет половину обычного режущего инструмента. В процессе части заготовки разгоняются, вследствие чего происходит деформация и происходит расслоение материала [4]. В зависимости от настройки формы и геометрии заготовки деталь может быть сжата, расширена или деформирована. С помощью специального штампа также можно выполнять операции перфорации.

Электромагнитно-импульсная сварка (ЭИС) представляет собой процесс холодной сварки в твердом состоянии, осуществляемый магнитным высокоскоростным ударом под малым углом между двумя металлическими поверхностями [5]. Этот процесс имеет тот же принцип работы, что и сварка взрывом [6], т.е. основан на столкновении частиц с высокой скоростью удара, в данном случае приводимыми в движение электромагнитной силой. Если условия правильные, т.е. скорость заготовки и угол точки столкновения, в зависимости от начального расстояния зазора между сопрягаемыми поверхностями и расстояния перекрытия между катушкой и деталью, струйная обработка

поверхностных слоев в точке столкновения между двумя склеиваемыми поверхностями возникает под действием силы удара, что приводит к эффективному сварному шву. При ударе естественно окисленные поверхности отрываются и выбрасываются за счет близкого угла удара и очень высоких скоростей. Поверхности, которые затем становятся вязкопластичными, прижимаются к тесному контакту магнитным давлением, что позволяет обмениваться валентными электронами и связываться на атомном уровне. Этот эффект позволил бы постоянно связывать сильно разнородные металлы. Следует отметить, что для ЭИС давления в точке соприкосновения сопрягаемых поверхностей имеют значения порядка 1 ГПа (индукционная сварка композитов использует давление около 1МПа) [7]. ЭИС различных металлов и сплавов обычно выполняется на геометрии сварки труб для таких компонентов, как топливные фильтры, капсулы высокого давления, приводные валы и т.д. Преимущества ЭИС включают: производство металлургической связки без образования швов и зазоров; имеет превосходное качество сварки с точки зрения сцепления материалов (для многих типов разнородных металлов) до уровня, при котором проблемы с коррозией в месте соединения могут быть решены вмешательством человека.

Электромагнитно-импульсный обжим (ЭМО) имеет аналогичные технологические особенности ЭИС, за исключением того, что внутренняя часть сборки заменяет матрицу, обычно используемую в ЭИР. При этом не ожидается оценка осевой формы подгонки заготовок или создание механических соединений по форме с помощью накатных или специально разработанных поверхностей, а также посредством вычислительной геометрии канавок на поверхности материала. Принцип работы ЭМО с деталью-заготовкой представлен на рис. 2.

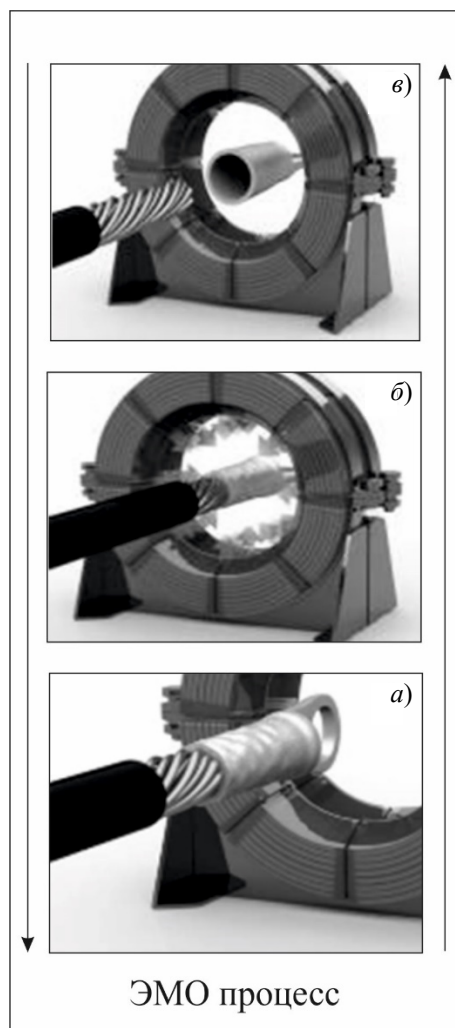


Рис. 2. Принцип работы ЭМО: *а* – ввод заготовки (материала); *б* – процесс деформации внешней заготовки (материала) относительно внутренней посредством электрического заряда; *в* – удаление заготовки (материала)

На рис. 2 ЭМО процесс представлен для снятия обжатия с алюминиевого кабельного наконечника поверх медного провода. Здесь магнитные силы генерируются концентрически по направлению к центру кольцеобразной катушки. Два соединительных элемента размещены внутри катушки. В результате разряда тока, который создает силы, необходимые для сжатия трубчатого конца соединителя, достигается механическая блокировка между материалами, что приводит к превосходному результату технологической операции [8].

Структура явления электромагнитного процесса. Описание физических особенностей

Основная идея, лежащая в основе электромагнитных процессов, состоит в том, что сильное магнитное поле индуцирует электрические токи в вязкопластичных электрических проводниках, в результате чего возникают силы Лоренца, вызывающие их деформацию. Электромагнитные процессы металлообработки могут быть описаны гармонической по времени магнитной формулой Максвелла.

Показав, что электрические токи могут влиять на стрелку компаса, Эрстед (1820 г.) доказал, что электрические и магнитные поля – это два взаимосвязанных физических явления. Позже Ампер, Фарадей и Гаусс разработали математические модели для описания электромагнитных явлений, которые легли в основу единой теории электродинамики, разработанной Джеймсом Клерком Максвеллом [9].

Первое уравнение Максвелла основано на работе, представленной Фарадеем, в которой показано, что изменяющееся во времени магнитное поле B всегда сопровождается изменяющимся в пространстве неконсервативным электрическим полем E , и наоборот:

$$\nabla E = \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (1)$$

где t представляет время и символ ∇ – оператор скручивания.

Гауссовский закон электричества, более известный как второе уравнение Максвелла, утверждает, что плотность электрического потока D через любую замкнутую поверхность, пропорциональна заключенному электрическому заряду Q . Если заряд Q непрерывно распределяется по объему, Гауссовский закон будет даваться следующим уравнением:

$$\nabla D = \rho, \quad (2)$$

где ρ – плотность заряда (кулоны на кубический метр).

Основная идея закона Ампера – Максвелла или же его третьего уравнения состоит в том, что электрический ток или изменяющийся электрический поток через поверхность создает циркулирующее магнитное поле вокруг любого пути, ограничивающего эту поверхность. Другими словами, Максвелл исправил закон Ампера, заявив, что магнитные поля могут создаваться двумя способами: электрическим током (это был первоначальный «закон Ампера») и изменением магнитного поля (поправка Максвелла) [10]. Модификация Максвелла к закону Ампера очень важна: она показывает, что не только изменяющееся магнитное поле индуцирует электрическое поле, но и изменяющееся электрическое поле индуцирует магнитное поле. Тогда дифференциальное уравнение, приписываемое Амперу – Максвеллу, имеет вид

$$\nabla H = J, \quad (3)$$

где H является магнитной напряженностью поля; J – плотность электрического тока.

Четвертое уравнение Максвелла связано со свойствами магнитного потока. Магнитные полюса встречаются в природе всегда как равные и противоположные пары. Источниками магнитного поля являются токи или движущиеся заряды. Фактически можно утверждать, что электрический заряд является первоисточником электрических и магнитных полей; следовательно, магнетизм является результатом электрически заряженных частиц. Поскольку магнитных зарядов не существует, линии магнитного потока должны быть замкнутыми. Все линии, входящие в замкнутую поверхность, должны также выходить из нее. Этот постулат приводит к формулировке четвертого уравнения Максвелла, которое можно выразить следующим образом: поскольку поле колеблется с одной фиксированной частотой, векторное преобразование дает стационарное уравнение, которое решается для амплитуды и фазы A . Это преобразование задается следующими уравнениями, где a – комплексное число:

$$A = \text{Re}[a(\cos \omega t + j \sin \omega t)] = \text{Re}[ae^{j\omega t}]. \quad (4)$$

Подставляя в уравнение (4) и разделив комплексный член, можно получить уравнение, которое решает гармонические во времени магнитные задачи, учитывая, что магнитная проницаемость μ постоянна для гармонических задач:

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla a \right) = -j + j \sin \omega t - \nabla V . \quad (5)$$

Отметим, что решение такого набора дифференциальных уравнений в частных производных подразумевает знание нескольких свойств цепи и материала. Входной ток и частота могут быть рассчитаны или измерены. Для расчетов предположим, что система электромагнитных импульсов может быть описана эквивалентной электрической схемой. Она состоит из первичного колебательного контура, соединенного со вторичной LR -цепью (рис. 3).

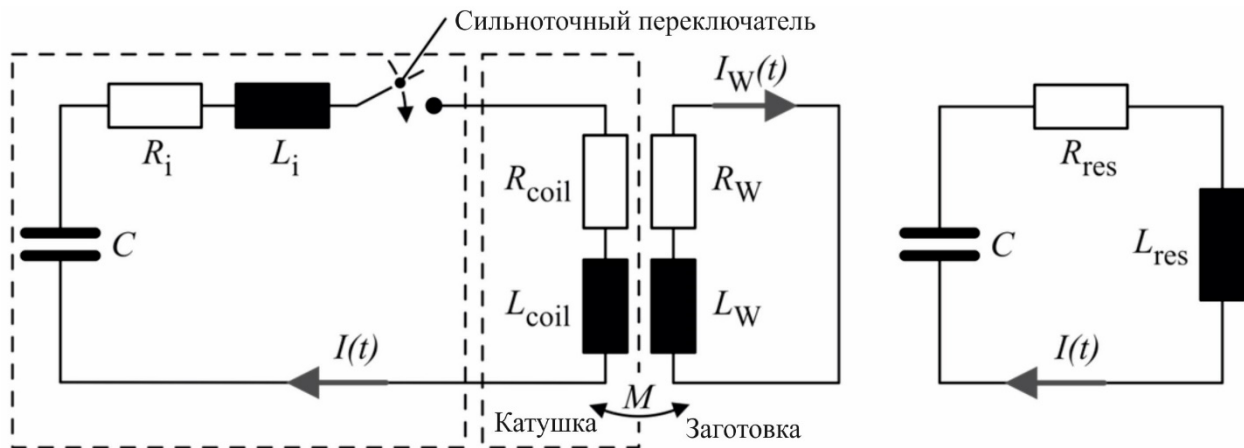


Рис. 3. Эквивалентная схема колебательного контура установки для работы с электромагнитной импульсной технологией

Такая схема может быть описана следующими дифференциальными уравнениями:

$$(L_1 + L_c) \frac{dI_1(t)}{dt} + M \frac{dI_2(t)}{dt} + (R_1 + R_c) I_1(t) + \frac{1}{C} \int I_1(t) dt = 0 , \quad (6)$$

$$\frac{d(L_2 I_2)}{dt} + \frac{d(M I_1)}{dt} + R_2 I_2 = 0 , \quad (7)$$

где C – значение емкости конденсаторной батареи (приведенные данные), $I_1(t)$ и $I_2(t)$ – ток катушки и наведенный вихревой ток в изделии соответственно, L_1 и R_1 – индуктивность и сопротивление катушки, L_2 и R_2 – индуктивность и сопротивление детали, L_c и R_c – индуктивность и сопротивление соединительного провода, M – общая взаимная индуктивность между катушкой и деталью. Эти уравнения важны для получения тока разрядной катушки ($I_1(t)$) и наведенный вихревой ток ($I_2(t)$), который протекает через заготовку [11]. Уравнения (6) и (7) можно решить, используя начальные условия, заданные формулами

$$I_1 = 0, (L_1 + L_c) \frac{dI_1(t)}{dt} = V_0 , \quad (7)$$

$$I_2 = 0 , \quad (8)$$

где V_0 – напряжение разряда. Параметры, такие как индуктивность и сопротивление катушки, можно рассчитать математически, зная ее геометрию и исходный материал. Разрядный ток $I_1(t)$, протекающий в катушке, можно приближенно описать следующим уравнением:

$$I_1(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau} \sin \omega t} \quad (9)$$

с I_0 максимальной силой тока, ω текущей частотой и τ коэффициентом демпфирования, характеризующим экспоненциальный спад разрядного тока.

Такие параметры могут быть рассчитаны:

$$I_0 = V_0 \sqrt{\frac{C}{L_t}}; \quad (10)$$

$$\tau = \frac{2L_t}{R_t}; \quad (11)$$

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{L_t C}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\tau}\right)^2}. \quad (12)$$

Катушка является инструментом в электромагнитных соединительных процессах. Инструментальная катушка отвечает за проведение тока и, следовательно, за установление временного локального распределения магнитного поля и давления.

Существуют одноразовые и постоянные катушки [12]. Одноразовые катушки представляют собой обмотки, изготовленные из медных проводов, для экспериментальных работ или технико-экономических испытаний. Постоянные катушки необходимы для многократного производства в промышленных целях. Конструкция и выбор материала для постоянных катушек намного сложнее, чем для одноразовых катушек.

В соответствии с работой [12], катушка должна обеспечивать высокий коэффициент преобразования, отношение энергии батареи конденсаторов к работе деформации заготовки, высокую механическую стойкость, оптимальную частоту разрядного тока, устойчивость к электрическим перенапряжениям, надежное подключение к машине и простоту конструкции.

Во время экспериментов с электромагнитным импульсом катушка инструмента подвергается экстремальным нагрузкам. Действуют силы Лоренца, развиваемые при деформации заготовки, как силы реакции на катушку. Электромагнитный привод должен поглощать эти противоположные силы реакции, а также силы между витками обмотки без какой-либо деформации. Кроме того, из-за импульсов высокого тока катушка должна выдерживать электрические и тепловые нагрузки.

При этом эффективность многovitковой катушки обычно выше, чем у одновитковой. Тем не менее благодаря высокой прочности однослойные одновитковые катушки широко используются для операций по ТЕМИ, когда целью является обжатие заготовок.

С точки зрения материала, хорошая электропроводность и высокая механическая стойкость к импульсным нагрузкам и тепловым ударам требуются независимо от геометрии катушки. Медно-бериллиевые сплавы, циркониевая и кадмиевая медь, вольфрам-молибден и даже сталь используются для изготовления электромагнитных инструментов для операций по ТЕМИ [13]. Используя модель невязкой жидкости для оценки импульса в зависимости от скорости столкновения и угла, оценим область для успешного сварного шва. Вместо использования интерфейса волна/отсутствие волны в качестве критерия предложим возникновение шов/отсутствие шва и есть реакция/нет реакции (рис. 4).

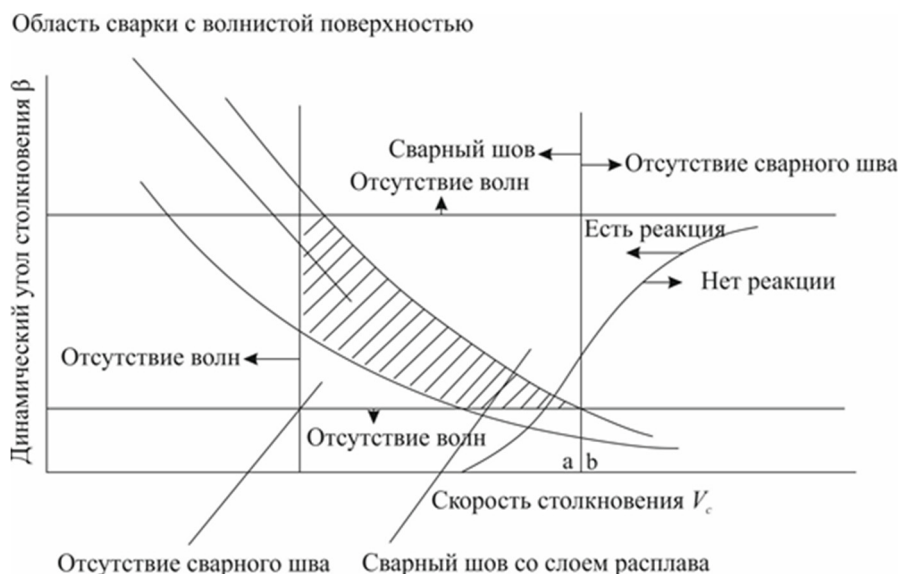


Рис. 4. Общее окно свариваемости для заготовки по ТЕМИ

Правая граница соответствует образованию волны в точке столкновения, что необходимо для склеивания материалов. Поверхностная обработка и, следовательно, сварка происходят слева от этой границы. Эта правая граница ограничена максимальной скоростью, допустимой в точке столкновения. Делаем вывод, что скорость V_c в точке столкновения должна быть меньше скорости звука соединяемых материалов и, с другой стороны, максимальная скорость зависит от динамического угла столкновения β :

$$v_c = \frac{\beta}{10} + 5,5. \quad (13)$$

Левая граница связана со скоростью, при которой волны еще формируются на границе раздела материалов. Предположим, что эти границы могут быть заданы следующим образом:

$$v_c = \left[\left(\frac{2 \operatorname{Re}(H_{v,p} + H_{v,f})}{\rho_p + \rho_f} \right) \right]^{1/2}, \quad (14)$$

где ρ_p и ρ_f – это плотность основной и летучей пластин; $H_{v,p}$ и $H_{v,f}$ – твердость по Виккерсу; Re – критическое число Рейнольдса.

Исходя из расчетов предположим, что, как и правая граница, минимальная скорость образования волны также зависит от угла падения, а это означает, что она не должна быть прямой вертикальной линией [14].

Согласно уравнениям (12) и (13) нижняя граница должна быть переопределена таким образом, чтобы достигаемое ударное давление в точке столкновения превышало предел текучести материалов, чтобы способствовать пластической деформации и волнообразованию. Этот предел можно определить по приведенному ниже соотношению, где константа k принимает значения между 0,6 для пластин с чистой поверхностью и 1,2 для плохо очищенных поверхностей:

$$\sin \beta = k \sqrt{\frac{H_v}{\rho V_c^2}}. \quad (15)$$

Уравнение (15) можно записать в другом виде для такой же границы с учетом уравнений (13) и (14):

$$v_c = \frac{v_p}{2 \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}, v_p = 1,14 \sqrt{\frac{H_v}{\rho}}. \quad (16)$$

Что касается верхнего предела окна сварки, то он соответствует максимальной скорости удара, которая позволяет избежать образования межфазного расплавленного слоя, и может быть определен как

$$\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{1}{2N} \frac{(T_m C_0)^{1/2}}{V_c^2} \left(\frac{K C_p C_b}{\rho h} \right). \quad (17)$$

Поскольку механизмы образования струй и волн до конца не ясны, реальные пределы сварки, достигнутые экспериментальной проверкой, могут не совпадать с теоретическими границами, рассчитанными по предлагаемым подходам.

Заключение

На основании доступной литературы дальнейшее использование технологии электромагнитных импульсов в качестве инструмента для соединения нескольких материалов было ограничено различными открытыми вопросами, которые демонстрируют необходимость дальнейших исследований. Тематические исследования и подробности о фиксированных параметрах процесса соединения, конструкции деталей, геометрии соединения, затрат и общих преимуществ в производительности почти всегда неизвестны [15]. Продемонстрировать возможности усовершенствованного процесса соединения

для преодоления трудностей, присущих комбинированию материалов разнородного типа (металл/композит, черный/цветной металл, медь/алюминий), по-прежнему необходимо для проведения углубленного анализа всех критических этапов процесса для реальных тематических исследований.

Тем не менее практически доказана эффективность ТЕМИ, которая заключается в отсутствии необходимости в дополнительной подготовке или очистке поверхности.

Список литературы

1. Иванов В. И., Поддубняк В. Я. Об определении энергетических параметров процесса электроискровой обработки металлических поверхностей // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика : материалы 16-й Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 15–18 апреля 2014). СПб. : Изд-во Политехн. ин-та, 2014. Ч. 2. С. 64–67.
2. Гитлевич А. Е., Михайлов В. В., Парканский Н. Я., Ревуцкий В. М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев : Штиинца, 1985. 196 с.
3. Бурумкулов Ф. Х., Лезин П. П., Сенин П. В. [и др.]. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика). Саранск : Красный Октябрь, 2003. 504 с.
4. Иванов В. И., Бурумкулов Ф. Х. Состояние и развитие электроискровых технологий и оборудования в России и за рубежом // Труды ГОСНИТИ. 2012. № 109. С. 127–139.
5. Рыбалко А. В., Симинел А. В., Сахин О. Электроискровое легирование изоэнергетическими импульсами тока различной формы // Металлообработка. 2003. № 1. С. 18–23.
6. Иванов В. П., Ивашко В. С., Константинов В. М. [и др.]. Восстановление и упрочнение деталей : справочник. М. : Наука и технологии, 2013. 367 с.
7. А. с. 89933 (СССР). Способ нанесения металлических покрытий / Лазаренко Б. Р. Опубл. в БИ. 1951. № 12.
8. Лазаренко Н. И. Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами. Электроискровая обработка металлов. М. : Изд-во АН СССР, 1960. Вып. 2. С. 26–66.
9. Жумабаева А. С., Айжариков К. А., Бикеев Р. Р. Математическая обработка информации параметров излучения подвижного объекта // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 99–104.
10. Затылкин А. В., Калашников В. С., Телегин А. М. Методика оценки эффективности виброзащиты РЭС с применением интегрального критерия неэффективности виброизолятора // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 4. С. 65–72.
11. Дедков В. К., Северцев Н. А. Косвенные методы прогнозирования надежности. М. : ВЦ им. Дородницына РАН, 2006. 272 с.
12. Литвинов А. Н., Юрков Н. К. Моделирование напряженно-деформированного состояния в слоистых структурах РЭС при технологических и эксплуатационных воздействиях // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 3. С. 16–22.
13. Паршуков М. Ю., Светлов А. В., Комаров В. В., Сапунов Е. В. Методики входного контроля параметров операционных усилителей // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 56–61.
14. Увайсов С. У., Сулейманов С. П., Юрков Н. К. Метод теплового диагностирования латентных технологических дефектов радиоэлектронной аппаратуры и ее тепловая диагностическая модель // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 4. С. 109–118.
15. Tsyplin B. V., Yurkov N. K. Diagnostics of Integrated Operational Amplifiers Mounted on Circuit Boards Measurement Techniques. N.Y. : Springer, 2002. Vol. 45, № 2. P. 210–213.

References

1. Ivanov V.I., Poddubnyak V.Ya. On determining the energy parameters of the process of electric spark treatment of metal surfaces. *Tekhnologii uprochneniya, naneseniya pokrytiy i remonta: teoriya i praktika: materialy 16-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Sankt-Peterburg, 15–18 aprelya 2014) = Technologies of hardening, coating and repair: theory and practice : materials of the 16th International scientific and practical conference. (St. Petersburg, April 15-18, 2014)*. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhn. in-ta, 2014;2:64–67. (In Russ.)
2. Gitlevich A.E., Mikhaylov V.V., Parkanskiy N.Ya., Revutskiy V.M. *Elektroiskrovoe legirovanie me-tallicheskih poverkhnostey = Electric spark alloying of metal surfaces*. Kishinev: Shtiintsa, 1985:196. (In Russ.)
3. Burumkulov F.Kh., Lezin P.P., Senin P.V. et al. *Elektroiskrovoye tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya detaley mashin i instrumentov (teoriya i praktika) = Electric spark recovery and hardening technologies of machine parts and tools (theory and practice)*. Saransk: Krasnyy Oktyabr', 2003:504. (In Russ.)
4. Ivanov V.I., Burumkulov F.Kh. The state and development of electric spark technologies and equipment in Russia and abroad. *Trudy GOSNITI = Proceedings of GOSNITI*. 2012;(109):127–139. (In Russ.)
5. Rybalko A.V., Siminel A.V., Sakhin O. Electric spark alloying by isoenergetic current pulses of various forms. *Metallrobrabotka = Metalworking*. 2003;(1):18–23. (In Russ.)

6. Ivanov V.P., Ivashko V.S., Konstantinov V.M. et al. *Vosstanovlenie i uprochnenie detaley: spravochnik = Restoration and hardening of parts : handbook*. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2013:367. (In Russ.)
7. A. s. 89933 (SSSR). *Sposob naneseniya metallicheskih pokrytiy = A. S. 89933 (USSR). Method of applying metal coatings*. Lazarenko B.R. publ. in BI. 1951;(12). (In Russ.)
8. Lazarenko N.I. *Tekhnologicheskiy protsess izmeneniya iskhodnykh svoystv metallicheskih poverkhnostey elektricheskimi impul'sami. Elektroiskrovaya obrabotka metallov = Technological process of changing the initial properties of metal surfaces by electric pulses. Electric spark processing of metals*. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1960;(2):26–66. (In Russ.)
9. Zhumabaeva A.S., Ayzharikov K.A., Bikeev R.R. Mathematical processing of information about radiation parameters of a mobile object. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):99–104. (In Russ.)
10. Zatylnkin A.V., Kalashnikov V.S., Telegin A.M. Methodology for evaluating the effectiveness of RES vibration protection using the integral criterion of vibration isolator inefficiency. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(4):65–72. (In Russ.)
11. Dedkov V.K. Severtsev N.A. *Kosvennyye metody prognozirovaniya nadezhnosti = Indirect methods of reliability forecasting*. Moscow: VTs im. Dorodnitsyna RAN, 2006:272. (In Russ.)
12. Litvinov A.N., Yurkov N.K. Modeling of the stress-strain state in layered structures of RES under technological and operational impacts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(3):16–22. (In Russ.)
13. Parshukov M.Yu., Svetlov A.V., Komarov V.V., Sapunov E.V. Methods of input control of parameters of operational amplifiers. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(2):56–61. (In Russ.)
14. Uvaysov S.U., Suleymanov S.P., Yurkov N.K. Method of thermal diagnostics of latent technological defects of radioelectronic equipment and its thermal diagnostic model. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2013;(4):109–118. (In Russ.)
15. Tsyplin B.V., Yurkov N.K. *Diagnostics of Integrated Operational Amplifiers Mounted on Circuit Boards Measurement Techniques*. New York: Springer, 2002;45(2):210–213.

Информация об авторах / Information about the authors

Денис Викторович Дерябин

заместитель генерального директора по производству,
 Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов
 (Россия, г. Пенза, ул. Каракозова 44)
 E-mail: niiemp@niiemp.ru

Николай Владимирович Горячев

кандидат технических наук,
 доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: ra4foc@yandex.ru

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
 заслуженный деятель науки РФ,
 заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры,
 Пензенский государственный университет
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
 E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Denis V. Deryabin

Deputy production general manager,
 Research Institute of Electronic and Mechanical Devices
 (44 Karakozova street, Penza, Russia)

Nikolay V. Goryachev

Candidate of technical sciences, associate professor
 of the sub-department of radio equipment design and production,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
 the honoured worker of science
 of the Russian Federation,
 head of the sub-department
 of radio equipment design and production,
 Penza State University
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 27.03.2023

Поступила после рецензирования/Revised 31.03.2023

Принята к публикации/Accepted 03.05.2023