

УДК 537.634, 621.791

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ В ПЛОСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

М. Н. Казеев, В. С. Койдан, В. Ф. Козлов, Ю. С. Толстов

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва
E-mails: kazeev@nfi.kiae.ru, koidan@nfi.kiae.ru, v-kozlov@nfi.kiae.ru, tolstov@nfi.kiae.ru

Приведены результаты исследования возможности осуществления магнитно-импульсной сварки плоских проводников. Экспериментально исследованы различные схемы индукторов и конфигурации пластин. Представлена схема оптимизированного индуктора для ускорения плоских проводников магнитным полем, разработано необходимое диагностическое оборудование. Приведены результаты экспериментов по ускорению плоских проводников и получению сварных соединений алюминий — алюминий и алюминий — сталь. Исследованы характеристики полученных сварных соединений.

Ключевые слова: электрический разряд, сильное магнитное поле, магнитно-импульсная сварка, сварное соединение.

Введение. Целью данной работы является исследование ускорения плоских проводников сильным импульсным магнитным полем, столкновения этих проводников и условий образования сварных соединений. Эта задача актуальна для современных технологий модификации и обработки материалов. Магнитно-импульсная сварка (МИС) является динамическим процессом, т. е. выполняется при высокоскоростном соударении соединяемых тел.

Впервые МИС была реализована при использовании в качестве источника энергии взрывчатых веществ и получила название сварки взрывом [1]. При динамической сварке для образования неразъемного соединения необходимо на некоторое время сблизить поверхности соединяемых деталей на расстояние, равное радиусу действия межатомных сил, что достигается за счет высокого локального давления, возникающего в зоне контакта при скоростном соударении. Локальное давление $P = \rho v_n C_s$ (ρ — плотность материала; C_s — скорость звука в нем; v_n — относительная скорость соударения поверхностей тел) должно существенно превышать динамический предел пластичности σ_s свариваемых материалов. Оценки показывают, что скорость соударения v_n должна составлять несколько сотен метров в секунду. При такой скорости процесс соударения имеет ударно-волновой характер, поэтому поверхности соединяемых деталей должны располагаться под определенным углом α , чтобы волны разгрузки не разрушали образовавшееся соединение. При этом скорость движения v_τ линии контакта вдоль поверхности соединения не должна быть выше скорости звука в соединяемых металлах. При выполнении этих условий происходит скоростное “накатывание” одной поверхности на другую, сопровождающееся интенсивным

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-08-01147).

© Казеев М. Н., Койдан В. С., Козлов В. Ф., Толстов Ю. С., 2013

пластическим течением металла в тонких приповерхностных слоях, в результате чего возникает физический контакт, активируется поверхность и образуется сварное соединение.

Ранее методом МИС были получены соединения различных осесимметричных образцов из разнородных металлов [2–4]. В качестве индуктора использовались массивные одновитковые соленоиды. В данном случае для осуществления сварки плоских образцов необходимо найти приемлемую конфигурацию магнитного поля и обрабатываемых пластин, а также подобрать режим работы генератора и режим движения одной из пластин, удовлетворяющий условиям сварки (угол между пластинами — приблизительно 10° , скорость движения — $200 \div 300$ м/с). Следует отметить, что для разных пар металлов режимы магнитно-импульсной сварки различаются. В [5, 6] исследовалась возможность получения сварных соединений с использованием бесконтактного метода МИС, когда свариваемая пластина ускоряется в результате взаимодействия импульсного магнитного поля с индуцированным этим полем током. Показано, что с увеличением прочности свариваемых деталей прочность сварного соединения уменьшается.

В настоящей работе описана установка, предназначенная для ускорения плоских электропроводных образцов сильным импульсным магнитным полем. Приводятся результаты экспериментов по ускорению плоских проводников и получению сварных соединений алюминиевых пластин и алюминиевых пластин со стальными пластинами методом МИС в случае, когда разрядный ток течет по одному из свариваемых образцов.

1. Экспериментальная установка и диагностическая аппаратура. В качестве источника питания использовался генератор сильных токов ТРОБ-100, имеющий следующие технические характеристики: рабочий диапазон напряжений — $1 \div 25$ кВ, максимальная запасаемая энергия (при напряжении, равном 25 кВ) — 100 кДж, расчетная сила тока короткого замыкания (при напряжении, равном 25 кВ) — 5 МА, собственная индуктивность — 5 нГн, частота колебаний тока (при индуктивности нагрузки, равной 45 нГн) — приблизительно 40 кГц.

Эксперименты проводились при напряжении зарядки генератора, равном $7 \div 17$ кВ. На рис. 1 приведена типичная осциллограмма силы тока I , полученная в рассматриваемых экспериментах при напряжении $V_0 = 12,5$ кВ. При этом амплитуда тока составляет 1,04 МА, период колебаний приблизительно равен 19 мкс, частота колебаний тока $\omega = 3,32 \cdot 10^5$ с $^{-1}$, параметр затухания $\delta = 5,8 \cdot 10^4$ с $^{-1}$ ($\delta/\omega = 0,17$). Начальная ин-

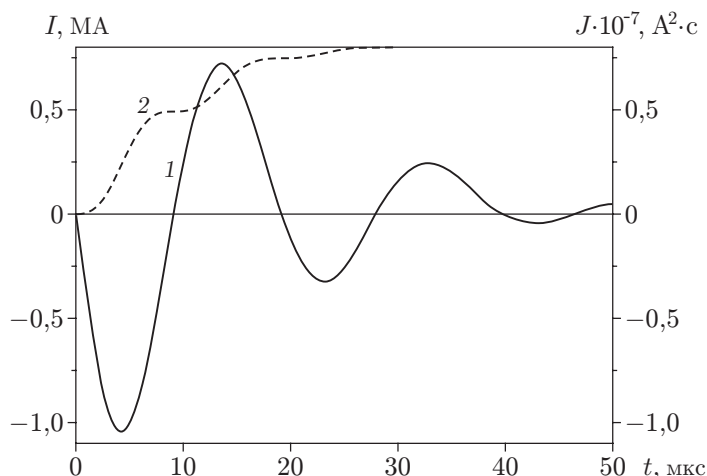


Рис. 1. Зависимости силы тока (1) и интеграла квадрата силы тока (2) от времени ($V_0 = 12,5$ кВ)

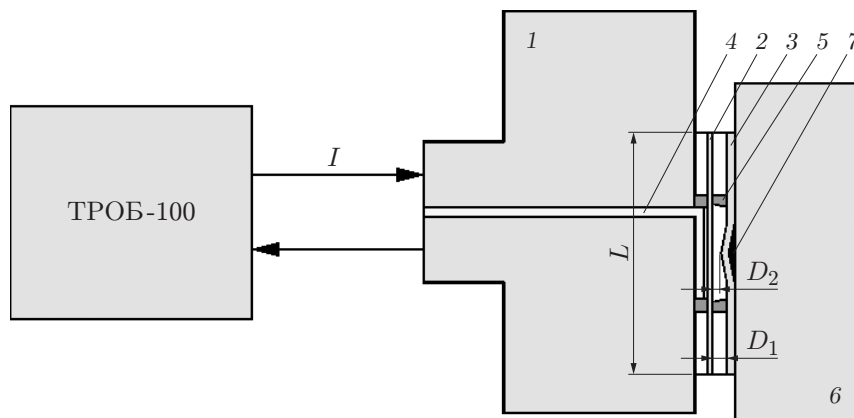


Рис. 2. Схема эксперимента:

1 — индуктор, 2 — ускоряемая пластина, 3 — неподвижная пластина, 4 — изоляция, 5 — контакты, 6 — упор, 7 — выступ для поддержки неподвижной пластины, D_1 , D_2 — расстояние между свариваемыми пластинами на периферии и в центре, L — длина образца

дуктивность равна 29 нГн. В этом случае энергия, запасенная в генераторе ТРОБ-100, составляет 23,4 кДж. На рис. 1 приведена также зависимость от времени интеграла квадрата силы тока $J = \int_0^t I^2 dt$. Длительность импульса давления магнитного поля составляет

приблизительно 20 мкс.

1.1. *Схема индуктора.* Для осуществления МИС плоских образцов может быть использован одновитковый соленоид. Однако реализация такой схемы эксперимента потребует увеличения амплитуды индукции магнитного поля вследствие малости коэффициента связи. В настоящей работе предложено и экспериментально исследовано несколько схем индукторов и конфигураций пластин. Наилучшие результаты получены при использовании схемы индуктора и конфигураций пластин, показанных на рис. 2.

Для данного варианта индуктора использовались две массивные токоведущие шины толщиной 20 мм и шириной 70 мм. Вблизи образцов ширина шин уменьшалась до 40 мм. Шины подсоединялись к генератору ТРОБ-100. Одна из пластин прижималась к краям шин, создавая электрические контакты. К этой пластине через контакты прижималась вторая пластина. Далее располагался блок изолятора для упора и поддержки пластин. Ток из генератора ТРОБ-100 протекал по верхней шине, затем через контакты перемещался вниз по движущейся пластине и возвращался в генератор по нижней шине.

Для того чтобы определить условия, при которых реализуется накат движущейся пластины на неподвижную, исследовались различные формы пар пластин (рис. 3).

Оценки показывают, что при величине индукции магнитного поля, равной 25 Тл, движущаяся пластина должна сталкиваться с неподвижной (расстояние между пластинами составляет 2 мм) через 9 мкс со скоростью около 450 м/с. В этот момент ее кинетическая энергия равна 27 Дж/см². Энергия, необходимая для деформации пластины, составляет приблизительно 2 Дж/см². В качестве образцов использовались пластины шириной 40 ÷ 60 мм, толщиной 1,0 ÷ 1,5 мм.

1.2. *Измерения магнитного поля.* Измерения магнитного поля в индукторе выполнены с помощью магнитных зондов, имеющих прямоугольное сечение. Размеры витков зонда составляли 0,58 × 5,63 мм, число витков $N = 4$. Индукция магнитного поля вычислялась

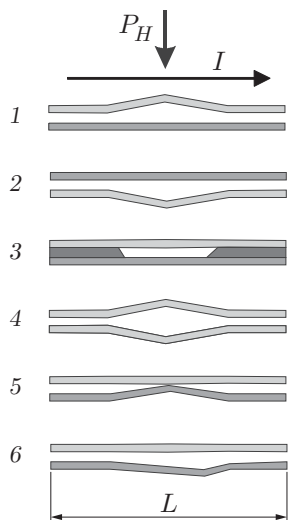


Рис. 3

Рис. 3. Конфигурации пар пластин:

1-6 — типы пластин, P_H — давление магнитного поля

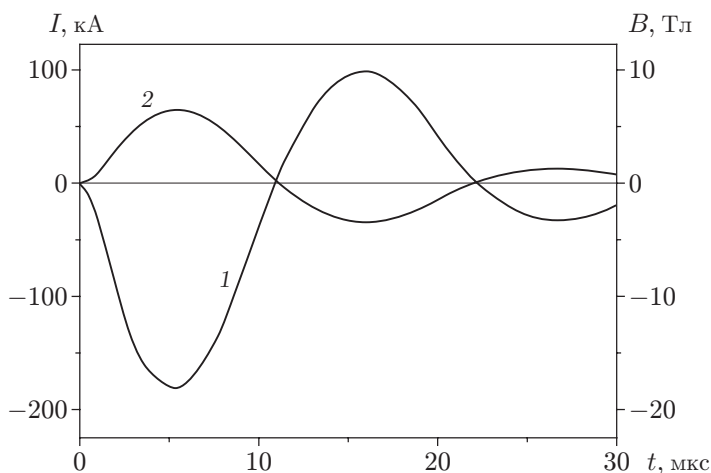


Рис. 4

Рис. 4. Зависимости силы тока (1) и индукции магнитного поля (2) в индукторе от времени ($V_0 = 3$ кВ)

по соотношению

$$B = \frac{1}{NS} \int_0^t V dt,$$

где N — число витков зонда; S — площадь сечения витка; V — напряжение сигнала магнитного зонда.

На рис. 4 приведены зависимости силы тока в индукторе и индукции магнитного поля от времени при ширине подводящей шины 35 мм и ширине движущейся пластины 40 мм. При измерении индукции магнитного поля в индукторе для исключения повреждения магнитных зондов напряжение зарядки генератора было уменьшено до значения $V_0 = 3$ кВ.

Индукция магнитного поля, генерируемого вблизи образцов, определяется по формуле

$$B = \frac{\mu_0 I}{b} \zeta,$$

где I — сила тока; b — ширина пластин вблизи образцов; $\zeta = \zeta(w/b)$ — формфактор; w — расстояние между пластинами; μ_0 — магнитная постоянная. При $b \gg w$ формфактор $\zeta \approx 1$. При движении ускоряемой пластины формфактор уменьшается, сила тока на краях пластины увеличивается. В рассматриваемой конфигурации в начале процесса $w = 0,2$ см, $b = 4$ см, $w/b = 0,05$, $\zeta \approx 1$. В момент столкновения пластин $w/b \approx 0,25$, при этом формфактор уменьшается до значения $\zeta \approx 0,65$.

На рис. 5 приведены полученные в экспериментах распределения магнитного поля в индукторе при наличии плоской неподвижной пластины. Магнитные зонды располагались в центре индуктора. Из результатов измерений следует, что при $I = 1000$ кА индукция магнитного поля в середине индуктора может составлять $45 \div 50$ Тл. Смещение пластины при ее ускорении приведет к уменьшению индукции поля вследствие изменения формфактора.

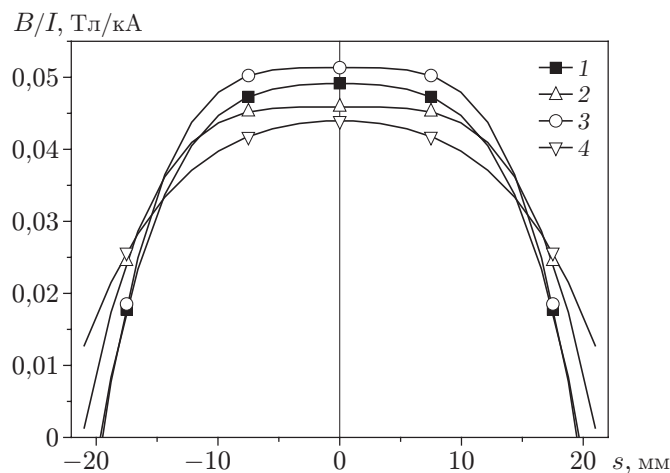


Рис. 5. Распределение магнитного поля по ширине индуктора s :

1–3 — расстояние между индуктором и движущейся пластиной 1 мм (1 — расстояние между контактами 36 мм; 2 — расстояние между контактами 20 мм; 3 — при наличии второй пластины); 4 — расстояние между индуктором и движущейся пластиной 4 мм

Результаты измерений показывают, что в центральной области индуктора вблизи внутренней поверхности движущейся пластины магнитное поле приблизительно однородно на участке шириной 2 см (см. рис. 5). Величина индукции магнитного поля между пластинами зависит от наличия или отсутствия электрического контакта между ними. Если контакт отсутствует, то для поля, находящегося в центре индуктора между пластинами, $B_{\max}/I_{\max} = 0,005$ Тл/А. При малом сопротивлении электрического контакта $B_{\max}/I_{\max} = 0,002$ Тл/А.

Таким образом, при использовании рассматриваемой схемы возможны создание магнитных полей и достижение скоростей движущихся пластин, необходимых для реализации МИС [3].

1.3. *Исследования образцов.* Для проведения экспресс-испытаний прочности сварного соединения применялась обычная для МИС процедура. После эксперимента образец подвергался испытаниям на прочность нагружением на отрыв и изгиб. В результате таких испытаний определялись характер и протяженность сварного соединения. Если при испытании пластина из одного материала отрывалась от пластины из другого материала, то сварка браковалась. В случае удовлетворительных результатов испытаний область соединения подвергалась более детальному исследованию: изготавливались шлифы, выполнялась макро- и микросъемка соединения, измерялась микротвердость материалов в окрестности соединения.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение. Было проведено более 100 экспериментов, в которых варьировались электротехнические параметры (напряжение зарядки генератора, параметр затухания); конфигурации пластин и их расположение; материалы пластин и их толщина.

Наилучшим вариантом расположения пар пластин оказался вариант, которому соответствует тип 5 на рис. 3.

В ряде экспериментов получено сварное соединение пары пластин из алюминия, исходные размеры которых составляли $100 \times 40 \times 1$ мм. Механическим испытаниям были подвергнуты два образца из алюминия марки АД1, сваренные методом МИС и имевшие при предварительном испытании максимальную прочность. Средняя микротвердость в зоне

сварного соединения составила приблизительно 481 МПа. В других экспериментах было получено сварное соединение пары пластин из алюминия и стали. Размеры исходных пластин составляли $100 \times 40 \times 1$ мм. Средняя микротвердость алюминия в зоне сварного соединения составила приблизительно 481 МПа, стали марки Ст.3 — около 1707 МПа.

Выполнены исследования микроструктуры сварного соединения. Зона соединения имеет характерную для МИС волновую структуру. Максимальные размеры области сварки — 25×20 мм. На краях пластин сварное соединение отсутствует, что, по-видимому, обусловлено неоднородностью ускоряющего магнитного поля.

В значительной части экспериментов первоначально не было получено качественных соединений, что объяснялось двумя причинами. Во-первых, центральная точка движущейся пластины обгоняет точки на периферии, при этом сама пластина ударяется о неподвижную пластину по нормали к поверхности, что может препятствовать образованию качественного соединения. Во-вторых, между пластинами (неподвижной и движущейся) имеется рассеянное магнитное поле, которое в процессе движения одной из пластин может увеличиваться за счет сжатия магнитного потока и в ряде случаев замедлять ее движение. Для объяснения этого явления была измерена индукция магнитного поля между пластинами. Ее величина составила 10–12 % максимальной индукции поля на противоположной стороне движущейся пластины. Для того чтобы уменьшить индукцию, было уменьшено сопротивление электрического контакта между пластинами.

Испытания сваренных образцов на механическую прочность проводились на разрывной машине Instron. Максимально возможное усилие при нагружении растягиваемого образца составляло 100 кН, скорость растяжения — 1 мм/мин. Растяжение осуществлялось в направлении длины образца. Ширина зоны нагружения составляла 25 мм, что соответствовало размеру зоны сварки. Результаты анализа характеристик сварного соединения алюминиевых пластин показали, что при нагружении образцы разрушались по алюминию, а сварное соединение оставалось целым. Разрушение происходило в зоне, где толщина алюминиевой пластины уменьшалась. Предельная нагрузка на сварное соединение достигала 3000 Н. При разрушении сварного соединения алюминий — сталь нагрузка превышала 4000 Н, причем разрушение происходило по алюминию.

Из результатов анализа проведенных экспериментов следует, что для получения качественного сварного соединения необходимо оптимизировать процессы ускорения и столкновения пластин. На качество получаемого сварного соединения влияют следующие факторы: равномерность распределения поля в индукторе; качество электрического контакта между движущейся и неподвижной пластинами; конфигурация пластин; наличие профилированной стальной поддержки неподвижной пластины; наличие массивной стальной поддерживающей опоры (см. рис. 2); параметр затухания в цепи электрического разряда; характеристики поверхности свариваемых образцов [6].

Заключение. В данной работе определена возможность осуществления МИС алюминиевых и стальных пластин, в случае когда разрядный ток течет по свариваемому образцу.

Разработано и изготовлено оборудование для получения сварного узла. Проведены измерения силы тока и индукции магнитных полей, используемых для разгона пластин. Электротехническое оборудование позволяет получать магнитные поля вблизи обрабатываемых пластин в диапазоне $20 \div 50$ Тл при частоте колебаний $\omega = 3,32 \cdot 10^5$ с⁻¹ и параметре затухания $\delta = 5,8 \cdot 10^4$ с⁻¹. В процессе работы варьировались электротехнические параметры и размеры сварочного узла.

Получены сварные соединения алюминий — алюминий и алюминий — сталь. Это позволяет предположить, что в дальнейшем появится возможность получать методом МИС соединения других разнородных материалов.

Результаты испытаний на растяжение полученных сварных соединений образцов из алюминия показали, что предельная нагрузка на сварное соединение превышает 3000 Н. Нагрузка при разрушении сварного соединения алюминий — сталь превышает 4000 Н. Проведенные исследования микроструктуры материалов в зоне соединения показали, что она имеет волновой характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дерибас А. А.** Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1972.
2. **Дудин А. А.** Магнитно-импульсная сварка металлов. М.: Металлургия, 1979.
3. **Демичев В. Ф.** Использование сильных импульсных магнитных полей для сварки металлов // Атом. энергия. 1992. Т. 73, вып. 4. С. 278–284.
4. **Artzy B., Stern A., Frage N., et al.** Wave formation mechanism in magnetic pulse welding // Intern. J. Impact Engng. 2010. V. 37. P. 397–404.
5. **Aizawa T., Kashani M., Okagawa K.** Application of magnetic pulse welding for aluminum alloys and SPCC steel sheet joints // Weld. J. 2007. V. 86. P. 119–124.
6. **Kore S. D., Date P. P., Kulkarni S. V.** Effect of process parameters on electromagnetic impact welding of aluminum sheets // Intern. J. Impact Engng. 2007. V. 34. P. 1327–1341.

*Поступила в редакцию 29/XII 2012 г.,
в окончательном варианте — 13/VI 2013 г.*
