

Влияние параметров импульсов тока на развитие физического контакта при сварке металлов давлением

А. И. Вовченко, Л. Ю. Демиденко, В. Д. Половинка

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: iipt@iipt.com.ua*

Приведены результаты исследований влияния параметров импульсов тока на развитие площади физического контакта между соединяемыми поверхностями при сварке разнородных металлов в твердом состоянии. На примере соединения пары металлов сталь 20 + медь М1, сжатых давлением на уровне 50 МПа, определен наиболее предпочтительный диапазон изменения параметров импульсного тока: по амплитуде плотности тока с учетом скин-эффекта в пределах от $1 \cdot 10^9$ до $2 \cdot 10^9$ А/м² и по удельной суммарной энергии обработки в пределах от $0,6 \cdot 10^9$ до $1 \cdot 10^9$ Дж/м³, в котором можно эффективно управлять процессами пластического деформирования поверхностей, а значит, формированием сварного соединения.

Ключевые слова: сварка, разнородные металлы, твердое состояние, стадия образования физического контакта, пластическое деформирование, импульс тока большой плотности, электропластический эффект, электроконтактное сопротивление.

УДК 621.791.4: 537.5

Производство современных изделий связано с применением разнородных материалов, зачастую значительно отличающихся по своим физико-механическим свойствам и кристаллографическим характеристикам. Для соединения таких материалов наиболее широко используется сварка давлением, которая осуществляется за счет пластической деформации приконтактных объемов, как правило, без расплавления соединяемых материалов (в твердом состоянии) [1].

Анализ процесса сварки металлов в твердом состоянии показал, что при образовании физического контакта, который лимитирует образование сварного соединения, существуют определенные трудности. Например, при температурах ниже температуры рекристаллизации развитие физического контакта за счет деформации микронеровностей на поверхности соединяемых металлов может сопровождаться наклепом всего приповерхностного слоя. Упрочнение приконтактного объема может стать причиной того, что физический контакт прекратит развиваться. В таких случаях на помощь приходят специальные методы пластической деформации, основанные на дополнительном воздействии на металл, которые существенно облегчают пластическую деформацию. Один из таких методов, имеющий широкое практическое применение, – дополнительное воздействие на деформированный металл импульсным током большой плотности (примерно 10^9 А/м²) [2].

В ИИПТ НАН Украины разработан способ сварки металлов в твердом состоянии с использованием импульсов тока большой плотности [3], который является разновидностью сварки давлением с подогревом. Суть его в том, что сжатие и

пластическое деформирование приконтактных объемов свариваемых металлов осуществляются при температуре окружающей среды. Для интенсификации процессов микропластического деформирования металла на стадии образования физического контакта через зону деформации пропускают импульсы тока плотностью примерно 10^9 А/м² и длительностью порядка 10^{-4} с. Затем образцы подвергают термообработке, в результате образуется сварное соединение по типу диффузионного. Важно, что при этом не применяется специальная защита свариваемых поверхностей от окисления. Изоляция зоны сварки от окружающей среды обеспечивается в результате самогерметизации межконтактной зоны благодаря интенсивной пластической деформации поверхностных слоев соединяемых металлов, стимулированной импульсами тока. При последующем нагреве в герметизированном пространстве образуется автовакуум, способствующий самоочистке поверхностей от окисных пленок и образованию сварного соединения [4].

Цель настоящей работы – исследовать влияние параметров импульсов тока на развитие площади физического контакта между соединяемыми поверхностями при сварке металлов в твердом состоянии и определить наиболее предпочтительный диапазон изменения параметров импульсов тока, в котором можно эффективно управлять процессами пластического деформирования, а значит, формированием сварного соединения.

В работе [4] на основе результатов исследований изменения поверхностного рельефа сжатых пластин из разнородных металлов сталь20+ медь М1 под действием импульсов тока при различ-

ных схемах обработки электрическим током определено, что более рациональной с точки зрения развития физического контакта (при минимальных энергетических затратах) является схема с пропуском тока по одной стальной пластине. Показано, что при этом деформация рельефа поверхностей составляет не менее 40%, что обеспечивает при последующем нагреве получение сварного соединения удовлетворительного качества без образования интерметаллидов в приконтактной зоне сварки.

В связи со сказанным все экспериментальные исследования по влиянию параметров импульсов тока на развитие площади физического контакта между соединяемыми поверхностями разнородных металлов сталь 20+медь М1 проводили для схемы пропускания тока по одной стальной пластине, поскольку она к тому же более технологична. Для экспериментов выбирались образцы, представляющие собой прямоугольные пластины размером 170x12x2,5 мм, зона сварки, равная длине 22 мм, находилась посередине образцов (рис. 1).

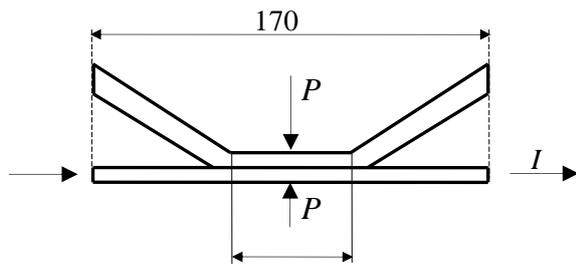


Рис. 1. Схема сжатия образцов для обработки импульсами тока.

Пластическое деформирование микровыступов на контактных поверхностях осуществляли сжатием образцов в специальном приспособлении до давления 50 МПа [5]. Перед сжатием образцов производили механическую зачистку контактных поверхностей. При этом поверхность меди имела более грубую чистоту подготовки, которая обеспечивалась за счет ее шлифования до высоты микронеровностей примерно 8 мкм, а контактная поверхность стальной пластины была полированной. По стальной пластине через зону деформации пропускали импульсы тока I , при этом амплитуда плотности тока J_m изменялась в диапазоне от 10^9 до 10^{10} А/м² при длительности импульсов не менее $2 \cdot 10^{-4}$ с (количество импульсов изменялось в интервале от 10 до 340).

Так как электропластический эффект пропорционален локальной плотности тока, амплитуду плотности тока в зоне контакта образцов рассчитывали с учетом скин-эффекта, заключающегося в концентрации электрического тока у поверхности. Именно такой расчет плотности тока в скин-слое позволил исключить влияние на

полученные результаты размерного фактора образца при неизменных электрических параметрах разрядного контура. При этом взаимовлияние двух соприкасающихся разнородных пластин не учитывалось.

Развитие площади физического контакта между поверхностями оценивалось косвенно – по деформации поверхностного рельефа медной пластины, поскольку известно, что физический контакт при сварке металлов с отличающимися прочностными свойствами образуется преимущественно в результате течения пластичного металла по поверхности более жесткого [1]. При этом деформация определялась в процентах по отношению суммарной площади зоны растекания поверхностного рельефа к общей площади контактной зоны. Чем больше деформация, тем больше площадь физического контакта.

Оценка изменения поверхностного рельефа после обработки импульсами тока производилась с помощью оптической металлографии при увеличении в 400 крат.

Вначале исследовали влияние суммарной удельной объемной энергии q_1 на деформирование поверхности медной пластины при амплитуде плотности тока единичного импульса: $J_m = 1,06 \cdot 10^9$ А/м². На каждом уровне удельной энергии изучалось не менее трех образцов, результаты статистически обрабатывались. По полученным результатам построена кривая зависимости деформации рельефа поверхности S_1 (в %) от величины суммарной удельной объемной энергии q_1 (рис. 2). Как видно из рисунка, с увеличением удельной объемной энергии q_1 растет деформация поверхностного рельефа S_1 медной пластины, в результате чего увеличивается площадь физического контакта между сжатыми пластинами. Причем наибольшие изменения S_1 имеют место в интервале изменения удельной объемной энергии от $0,58 \cdot 10^9$ до $0,9 \cdot 10^9$ Дж/м³. При дальнейшем увеличении удельной энергии q_1 ее роль в развитии физического контакта между пластинами несколько снижается, так как градиент изменения S_1 уменьшается.

Влияние тока на пластическую деформацию металла можно объяснить по механизму дополнительных эффективных напряжений, которые возникают за счет передачи импульсов силы и энергии от потока электронов проводимости на движущиеся дислокации и дислокации в скоплениях [2], в результате увеличивается скорость движения дислокаций и число подвижных дислокаций. При этом некоторые из них выходят на поверхность, а дислокации противоположных знаков частично аннигилируют. При каждом очередном разряде эти процессы повторяются, с той лишь разницей, что количество дислокаций,

приходящее в движение, уменьшается вследствие более прочного закрепления части из них в новых, энергетически более выгодных положениях и на труднопреодолимых барьерах. Этим объясняется монотонное уменьшение интенсивности пластической деформации. Кроме того, ее уменьшение связано со снижением давления в контактной зоне вследствие увеличения площади контакта.

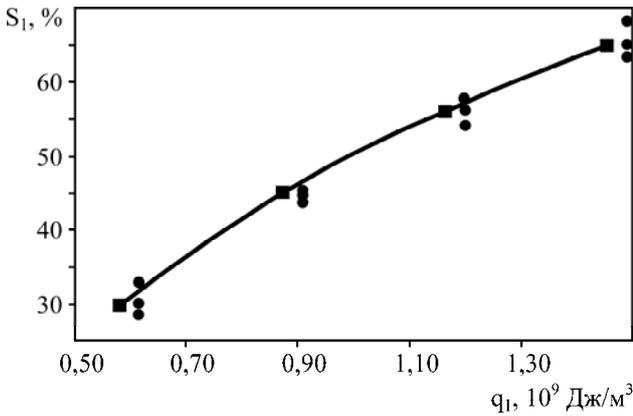


Рис. 2. Зависимость деформации поверхностного рельефа медной пластины от суммарной удельной объемной энергии q_1 при $J_m = \text{const}$.

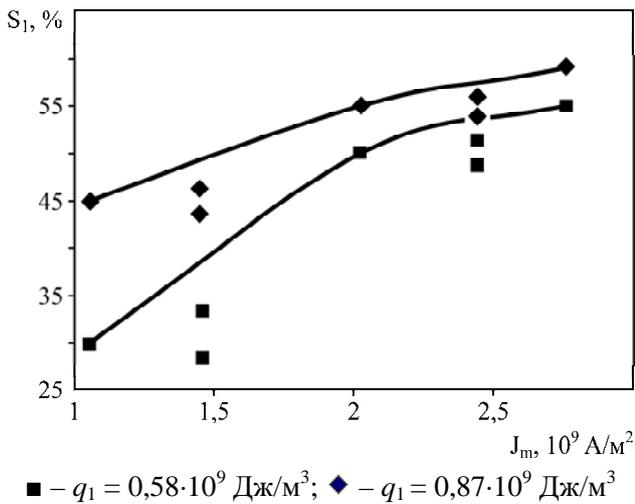


Рис. 3. Зависимость деформации поверхностного рельефа медной пластины от амплитуды плотности тока J_m .

Полученные результаты свидетельствуют о влиянии удельной объемной энергии на изменение площади физического контакта, особенно в начале обработки импульсами тока.

На следующем этапе исследовали влияние амплитуды плотности тока единичного импульса J_m в скин-слое на деформацию рельефа поверхности S_1 медной пластины при постоянной суммарной удельной энергии q_1 . При этом суммарная удельная энергия q_1 имела два значения: $0,58 \cdot 10^9$ и $0,87 \cdot 10^9$ Дж/м³. Полученные результаты представлены на рис. 3 в виде кривых зависимости $S_1 = f(J_m)$.

Характер зависимостей $S_1 = f(J_m)$ при разных значениях суммарной удельной энергии одинаков: с увеличением амплитуды плотности тока J_m происходит рост S_1 . В диапазоне изменения амплитуды плотности тока от $1,06 \cdot 10^9$ до $2,03 \cdot 10^9$ А/м² обе зависимости $S_1 = f(J_m)$ близки к прямо пропорциональной, затем выходят на насыщение. Увеличение удельной энергии при амплитуде плотности тока $\geq 2,03 \cdot 10^9$ А/м² приводит к смещению зависимости $S_1 = f(J_m)$ в сторону больших значений S_1 .

Анализируя результаты экспериментов, можно сделать следующие выводы.

При малых величинах амплитуды плотности тока в исследуемом диапазоне их изменения существенное влияние на пластическую деформацию поверхностных слоев металла оказывает суммарная удельная энергия, введенная в металл. Обусловлено это тем, что величина деформации поверхностного рельефа вначале прямо пропорциональна суммарной удельной энергии (см. рис. 2). Впоследствии это же объясняет разную интенсивность пластической деформации при контактных объемах металла в процессе развития физического контакта (характеризуется градиентом изменения S_1).

Для подтверждения выводов, сделанных на основе экспериментальных результатов, полученных с помощью оптической микроскопии при изучении влияния параметров импульсов тока на развитие площади физического контакта, параллельно были проведены подобные исследования, но с использованием другой, более точной методики, основанной на измерении контактного электросопротивления зоны сварки и представленной в работе [5].

При этом изменение относительной величины контактного электросопротивления в результате обработки импульсами тока предварительно сжатых пластин характеризует увеличение площади физического контакта между поверхностями. Чем больше изменение контактного электросопротивления, тем больше площадь физического контакта.

С учетом полученных результатов, исследовали влияние суммарной удельной объемной энергии q_1 на изменение контактного электросопротивления при двух разных амплитудах плотности тока единичного импульса J_m : $1,03 \cdot 10^9$ и $2,03 \cdot 10^9$ А/м². На каждом уровне удельной энергии исследовалось по два образца, результаты экспериментов арифметически усреднялись. В результате построена кривая зависимости усредненной величины относительного изменения контактного сопротивления $\Delta R/R_0$ (в %) от величины суммарной удельной объемной энергии q_1 (рис. 4).

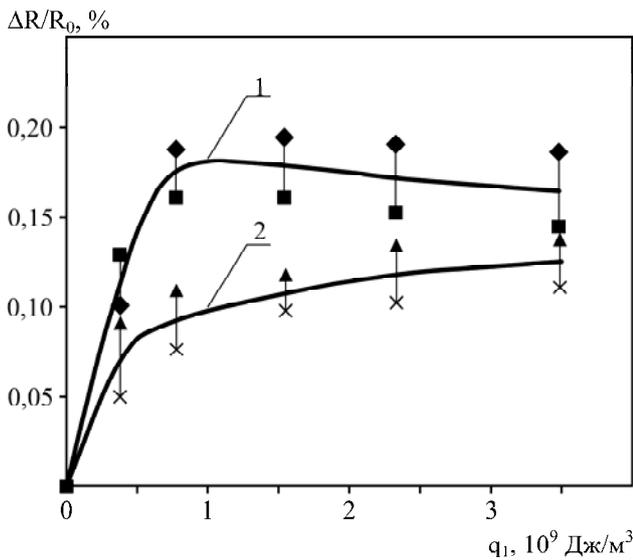


Рис. 4. Зависимость усредненной величины относительного изменения контактного электросопротивления $\Delta R/R_0$ от величины суммарной удельной объемной энергии q_1 при $J_m, \text{ А/м}^2$: 1 – $2,03 \cdot 10^9$; 2 – $1,06 \cdot 10^9$.

Визуальный анализ характера зависимостей $\Delta R/R_0 = f(q_1)$ при разных амплитудах плотности тока (рис. 4) показывает, что, с одной стороны, они схожи, так как с увеличением удельной объемной энергии q_1 происходил рост относительной величины изменения контактного электросопротивления. Причем в обоих случаях наибольшие изменения $\Delta R/R_0$ имели место в начальный период обработки сжатых пластин импульсами тока.

С другой стороны, явно видно, что при большем значении амплитуды плотности тока градиент изменения контактного электросопротивления гораздо больше (примерно в 2 раза). Соответственно изменение контактного электросопротивления в этом случае достигает более высоких абсолютных значений при одинаковой величине q_1 , а следовательно, больше площадь физического контакта. Это наблюдается при изменении суммарной удельной объемной энергии до величины, равной $\sim 10^9 \text{ Дж/м}^3$. Далее градиент изменения обеих зависимостей $\Delta R/R_0 = f(q_1)$ резко падает, а затем при $J_m = 1,06 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2$ зависимость $\Delta R/R_0 = f(q_1)$ выходит на насыщение, а при $J_m = 2,03 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2$ наблюдается даже незначительное снижение относительной величины контактного электросопротивления.

Наблюдаемые изменения относительной величины контактного электросопротивления, характеризующие развитие площади физического контакта, обусловленные воздействием электрического тока, можно объяснить следующим образом. В результате действия первых импульсов тока происходят срыв скоплений дислокаций со стопоров и деструкция полей внутренних напряжений в металле, причем эффект этот пропорци-

онален величине J_m . Благодаря этому интенсивность пластической деформации повышается, что приводит к существенному изменению относительной величины контактного электросопротивления за счет увеличения площади физического контакта. При последующих разрядах эти процессы повторяются, с той лишь разницей, что количество дислокаций, приходящее в движение, уменьшается вследствие снижения общего количества легкоподвижных дислокаций из-за более прочного закрепления части из них в новых энергетически более выгодных положениях. Это приводит к снижению интенсивности пластической деформации, а следовательно, уменьшению изменения относительной величины контактного электросопротивления. Более того, возможен даже незначительный рост электросопротивления (см. рис. 4, кривая 1), который объясняется усилением рассеивания электронов проводимости на дислокациях и увеличением по мере деформации плотности дислокаций и других дефектов структуры.

Полученные результаты свидетельствуют, что пропускание импульсов тока через зону деформации по одной стальной пластине, предварительно сжатой с медной пластиной, облегчает процесс пластической деформации поверхностных слоев обоих металлов в результате обеспечивается интенсивное развитие физического контакта между поверхностями свариваемых пластин, что в основном обусловлено электропластическим действием импульсного тока. Активация процесса пластифицирования поверхностных слоев металла в момент протекания импульсов тока объясняется тем, что электрический ток большой плотности инициирует срыв со стопоров дислокаций и нестационарное их движение [2]. При этом имеет место перестройка дислокационной структуры металла под действием механической деформации во время электроимпульсного воздействия.

Результаты проведенных экспериментов показали, что площадь физического контакта увеличивается при увеличении как удельной энергии обработки, так и амплитуды плотности тока за счет интенсификации пластической деформации поверхностных слоев соединяемых материалов. Однако для выбранной пары разнородных металлов сталь 20 + медь М1 более эффективным параметром с точки зрения достижения максимальной площади физического контакта при давлении на уровне 50 МПа является величина плотности тока. При этом пропускание импульсов тока большой плотности через контактную зону сжатых образцов не только повышает интенсивность пластической деформации, но и приводит к активации их поверхностей за счет

выхода в контактную зону дислокаций и других дефектов кристаллической решетки.

Таким образом, для пары металлов сталь 20+медь М1 при давлении на уровне 50 МПа определен наиболее предпочтительный диапазон изменения параметров импульсного тока: по амплитуде плотности тока с учетом скин-эффекта – в пределах $1 \cdot 10^9 - 2,2 \cdot 10^9$ А/м² и по удельной суммарной энергии обработки – в пределах $0,6 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^9$ Дж/м³, в котором можно эффективно управлять процессами пластического деформирования поверхностей, а значит, формированием сварного соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каракозов Э.С. *Сварка металлов давлением*. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
2. Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. *Физические основы и технологии обработки современных материалов. Теория, технология, структура и свойства*. В 2-х т. Т. 1. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 592 с.
3. UA 98039 Украина. МПК (2006.01) В23К 31/02, 11/20. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Половинко В.Д., Онацкая Н.А. *Способ сварки давлением деталей из разнородных металлов*.
4. Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Онацкая Н.А. Интенсификация пластической деформации поверхностей металлов под действием импульсов тока при сварке давлением. *Наукові нотатки: Міжвуз. зб.* 2011, (32), 63–68.
5. Вовченко А.И., Половинко В.Д., Демиденко Л.Ю. Влияние давления на образование физического контакта при сварке металлов в твердом состоянии с применением импульсов тока. *Электронная обработка материалов*. 2010, **46**(4), 18–22.

Поступила 30.05.12

После доработки 10.09.12

Summary

The paper presents the results of the study of the effect produced by the pulse current parameters on the changes, during welding of solid heterogeneous metals, in the contact area between the weldable surfaces. The composite from low-carbon steel and copper (steel 20 and copper M1) compressed by the pressure of 50 MPa has been used to determine the most preferable range of changes of pulse current parameters. They are: by an amplitude of current density with regard to the skin-effect within the range from $1 \cdot 10^9$ to $2 \cdot 10^9$ A/m², and by the specific total energy of treatment within the range from $0.6 \cdot 10^9$ to $1 \cdot 10^9$ J/m³ in which an efficient control of processes of plastic deformation of surfaces is feasible, and hence of the formation of butt-welded joints.

Keywords: welding, heterogenous metals, solid state, physical contact formation stage, plastic deformation, high density current pulse, electroplastic effect, contact electrical resistance.