

СВАРКА МЕТАЛЛОВ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСОВ ТОКА БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43а, г. Николаев, 54018, Украина, iipt@iipt.com.ua*

Исследования, проведенные в области диффузионной сварки ферритов с металлами с применением электрического взрыва проводника [1] и разрядно-импульсной сварки керамических материалов [2, 3], показали высокую эффективность применения импульсных методов обработки свариваемых поверхностей.

Аналогичный метод обработки свариваемых поверхностей с использованием электропластического эффекта (ЭПЭ) в металлах [4, 5] предложен в работе [6]. Оказывается, что предварительная обработка сжатых свариваемых поверхностей путем пропускания через них импульсов тока большой плотности позволяет производить нагрев и изотермическую выдержку стальных деталей в воздушной атмосфере.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния основных параметров и формы импульсов тока большой плотности на качество сварки плоских образцов из однородных и разнородных металлов при их термообработке на воздухе.

Исследования проводились на лабораторной установке (рис. 1), представляющей собой генератор импульсных токов (ГИТ) с зарядным напряжением $U = (20 - 40)$ кВ, емкостью конденсаторов $C = (2 - 32)$ мкФ, обеспечивающий необходимую форму, амплитуду и длительность импульса тока на исследуемом образце 5.

Разрядный контур ГИТ собран по схеме с регулируемым по времени закорачиванием нагрузки [7], что позволяет пропускать в нагрузку требуемое количество полуволн разрядного тока и регулировать его длительность. Регистрация электрических параметров разрядного контура проводилась с помощью высоковольтного делителя 2 и датчика тока 3 с использованием двухлучевого запоминающего осциллографа С9-6.

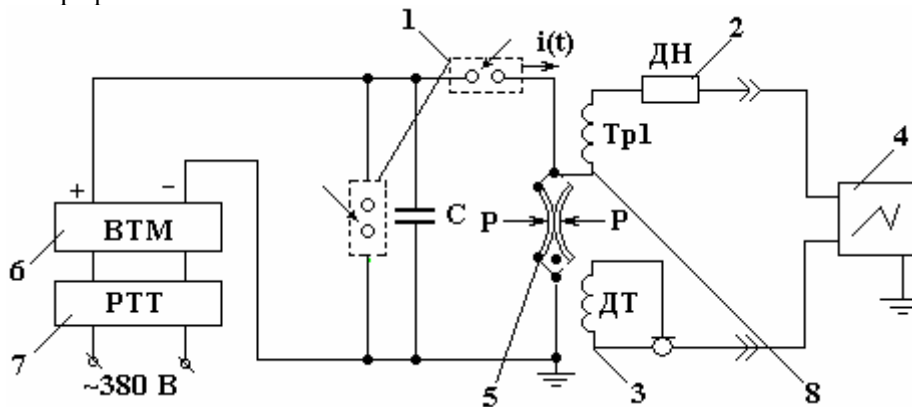


Рис. 1. Схема лабораторной установки. 1 – управляемый воздушный разрядник; 2 – делитель напряжения; 3 – датчик тока; 4 – двухлучевой запоминающий осциллограф; 5 – свариваемые детали; 6 – высоковольтный трансформатор; 7 – регулятор-трансформатор тока; 8 – тороидальный воздушный трансформатор

Исследовалось влияние двух видов импульса тока – однополярного и переменного с частотой колебаний $f = 10$ кГц (рис. 2) на величину деформации микронеровностей по конечной величине зазора между свариваемыми поверхностями.

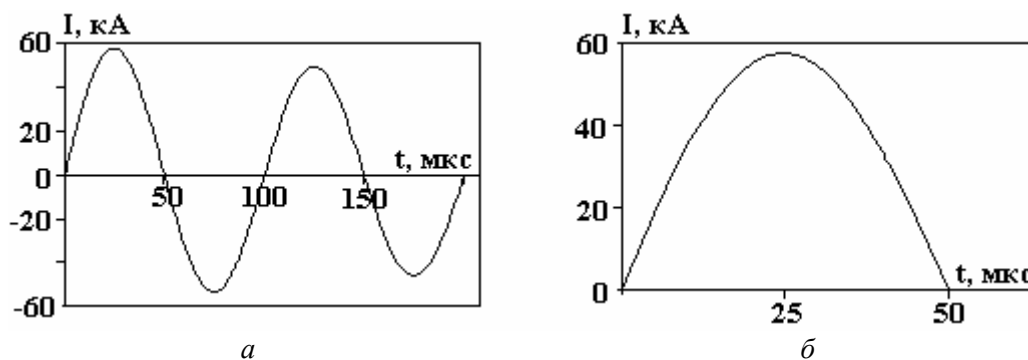


Рис. 2. Вид импульса тока, используемого в экспериментах. а – переменный; б – однополярный

Критерием необходимой величины обработки электрическим током являлось сближение контактирующих поверхностей до зазора $h = (1-0,5)$ мкм. Такой зазор, как показано в ранее проведенных исследованиях [8], обеспечивает получение сварного соединения осесимметричных деталей при нагреве их в воздушной среде.

Амплитудная плотность тока j_m изменялась от $0,8 \cdot 10^9$ до $1,6 \cdot 10^9$ А/м², длительность импульса τ колебалась от $50 \cdot 10^{-6}$ до $500 \cdot 10^{-6}$ с, а количество импульсов n варьировалось от 5 до 40, что позволило изменить удельную энергию обработки металла в зоне сварки $q_{уд}$ от 0,3 до 1,5 Дж/мм³. Частота повторения импульсов во всех случаях составляла 0,2 Гц.

Эксперименты проводились на плоских стальных (Ст3) и медных (М-3М) образцах с размерами $170 \times 15 \times 3,0$ мм. Подготовка свариваемых поверхностей состояла в обработке наждачной бумагой с зернистостью М 280, обеспечивающей высоту микронеровностей не более 6 мкм, и обезжиривании техническим уайт-спиритом. Образцы сжимали в приспособлении до контактного давления в зоне сварки 40 МПа (рис. 3), а затем поочередно каждая пластина обрабатывалась серией импульсов тока большой плотности. Обработанные образцы вместе с приспособлением нагревались в электрической печи в воздушной среде до температуры 810 °С с выдержкой в течение 10 минут. Охлаждение образцов произвели вместе с печью до температуры 200°С.

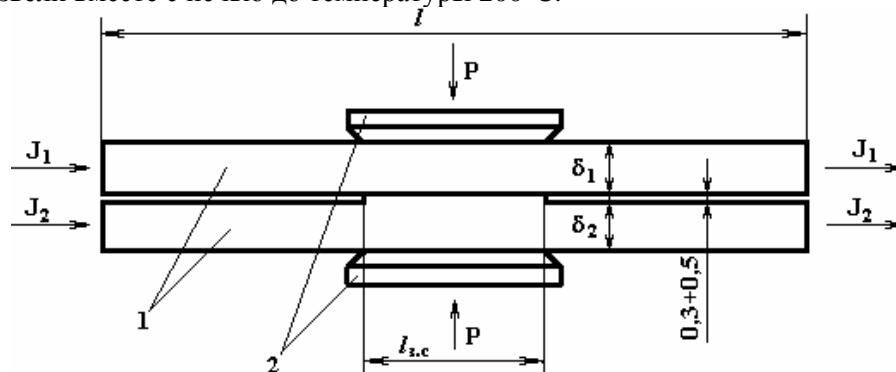


Рис. 3. Схема обработки импульсным током свариваемых образцов. 1 – образцы; 2 – зажим приспособления; $l_{з.с}$ – длина зоны сварки; l – длина образца; δ_1, δ_2 – толщина образца

Термодеформационный цикл сварки во всех случаях был постоянен, что позволило определить влияние импульсного тока большой плотности на величину общей деформации микронеровностей по конечной величине зазора между свариваемыми поверхностями. Зазор определялся по результатам металлографических исследований. Шлифы готовились из средней части зоны сварки в поперечном сечении и изучались при 250-кратном увеличении на оптическом микроскопе «Neofot -32». Величина зазора измерялась в 20 точках по длине зоны сварки.

В результате установлено, что при плотности тока $j_m \geq 1,2 \cdot 10^9$ А/м², длительности импульса $\tau_{и} \geq 200 \cdot 10^{-6}$ с происходит существенное смятие микронеровностей контактирующих поверхностей, и для уменьшения зазора h с 6,0 до 0,5–1,0 мкм минимальная удельная электрическая энергия обработки металла составляет не менее $q_{ст} = 0,8$ Дж/мм³ для стальных образцов и $q_{Cu} = 0,65$ Дж/мм³ – для медных. Причем величина этой энергии обработки как стали, так и меди не зависит от вида импульса тока (однополярный или переменный). Это позволило представить полученные результаты в виде зависимости, дающей возможность определить количество импульсов в серии, необходимое для смятия микронеровностей на контактной поверхности:

$$n = \frac{q \cdot V_{zc}}{W_u}; \quad (1)$$

где q – удельная электрическая энергия обработки металла, обеспечивающая смятие микронеровностей, Дж/мм³; V_{zc} – объем зоны сварки одной детали, мм³; W_u – электрическая энергия единичного импульса в зоне сварки, Дж.

Энергия единичного импульса W_u определяется по зависимости:

$$W_u = \frac{1}{2} J_o^2 \cdot R_{zc} \cdot \tau_u, \quad (2)$$

где R_{zc} – электрическое сопротивление образца на длине зоны сварки, Ом, J_o – амплитуда импульса тока, А.

Удельная энергия обработки металла определялась как отношение суммарной тепловой энергии, выделившейся в зоне сварки при прохождении серии импульсов тока, к объему зоны сварки одной детали (рис. 3).

С учетом полученных зависимостей осуществляли сварку плоских стальных и медных образцов. Геометрические характеристики образцов и подготовка свариваемых поверхностей были такие же, как и в предыдущих экспериментах. Для выбранных значений плотности j_m и длительности импульса тока τ_u по формуле (2) вычислили энергию единичного импульса и по ней определяли параметры генератора, обеспечивающие этот режим. Затем по формуле (1) определяли количество импульсов тока и проводили поочередную обработку деталей. После чего производили нагрев образцов при температуре 850°C в течение 15 мин. Образцы охлаждали вместе с печью до температуры 200°C.

Качество сварки оценивалось по результатам механических испытаний образцов на разрыв в соответствии с методикой, предложенной в работе [9], и по результатам металлографических исследований.

Анализ влияния режимов обработки импульсным током на результаты механических испытаний образцов (см. таблицу) показал, что при соблюдении условий (амплитудная плотность тока $j_m \geq 1,2 \cdot 10^9$ А/м², длительность импульса $\tau_u \geq 200 \cdot 10^{-6}$ с и удельная энергия обработки металла $q_{cm} = 0,8$ Дж/мм³ для стали, $q_{Cu} = 0,65$ Дж/мм³ для меди) данный способ обеспечивает качественную сварку при различных формах импульса тока как для однородных (опыты 1, 6, 7), так и разнородных металлов (опыты 5, 8).

В опытах 2, 3, 4 значения длительности, амплитуды импульса тока и удельной энергии обработки были ниже расчетных, что снизило качество сварки и разрушение произошло по зоне контакта.

Однако и в этом случае на стальной пластине по всей зоне контакта расположены гребневые прихватки и отсутствуют окисленные поверхности, то есть герметизация зоны сварки была обеспечена, но, по-видимому, не хватило энергии для активации диффузных процессов на контактной поверхности. При этом размеры зоны сварки соответствовали площади контактных давлений, создаваемых приспособлением.

Кроме этого, необходимо отметить результаты сварки стали с медью (опыты 5, 8), которые показали, что прочные соединения с разрывом по медной пластине ($\sigma_b = 160-170$ МПа) получаются на режиме $T = 850$ °С, $t = 15$ мин. В случае же диффузионной сварки стали с медью в вакууме [10] оптимальный режим обработки составляет $T = 900-950$ °С, $t = 20$ мин, $B = (10^{-3} - 10^{-4})$ мм рт. ст. Это, вероятно, указывает на то, что обработка импульсами тока большой плотности позволяет не только сблизить поверхности в зоне сварки на предварительном этапе, но и существенно влиять на диффузионные процессы при термообработке.

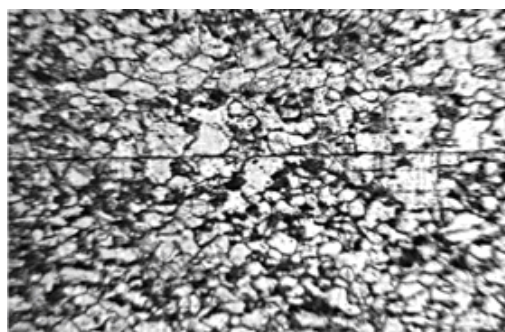
В зоне сварки стальных образцов (рис. 4,а) характерно образование общих зерен, а зона контакта представляет собой прерывистую линию с шириной не более 0,4 мкм. В зоне сварки стали с медью (рис. 4,б) наблюдается сплошная линия контакта с шириной, близкой к ширине границы зерна в стали. Интерметаллические прослойки отсутствуют, то есть диффундирующие элементы растворяются в решетке металла основы, образуя твердые растворы.

Обсуждая результаты, полученные в данной работе, необходимо отметить следующие моменты. Кроме защиты зоны сварки от окисления наружным воздухом, сближение поверхностей до зазора 0,5–1,0 мкм приводит к тому, что находящийся между микронеровностями воздух вытесняется наружу и к концу обработки током объем воздуха в зоне сварки существенно уменьшается по сравнению с начальным объемом. Такие условия в процессе термообработки приводят к автовакуумированию контактной поверхности [11], так как оставшееся незначительное количество воздуха диффун-

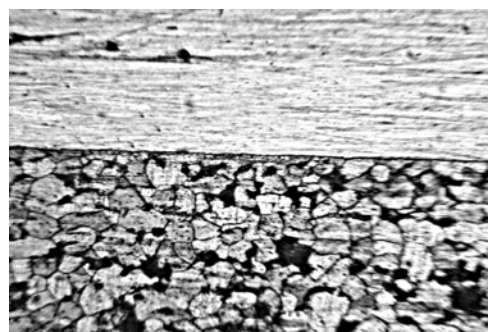
дирует в металл, а новые порции воздуха не поступают в зону сварки из-за малых зазоров между контактными поверхностями. Происходит очищение поверхности сварки от жировых и окисных пленок и дальнейшее смятие микронеровностей за счет повышения термической пластичности материалов, что приводит к сближению поверхностей до уровня межатомного взаимодействия металлов, активации взаимной диффузии и образованию соединения с преобладанием металлической связи.

Результаты механических испытаний сварных соединений

№ п/п	Материал образцов	Плотность тока $j_m \cdot 10^{-9}$, А/м ²	Длительность импульса $\tau \cdot 10^6$, с	Вид импульса тока	Механические испытания на разрыв	Удельная энергия обработки q , Дж/мм ³	Число импульсов обработки n
1	Ст3	1.2	200	Однополярный	по основному металлу	0.8	25
	Ст3	1.2	200	- / -		0.8	25
2	Ст3	1.2	100	- / -	по соединению	0.8	50
	Ст3	1.2	100	- / -		0.8	50
3	Ст3	1.0	200	- / -	по соединению	0,8	36
	Ст3	1.0	200	- / -		0,8	36
4	Ст3	1.2	200	- / -	по соединению	0,55	17
	Ст3	1.2	200	- / -		0,55	17
5	Ст3	1.2	200	- / -	по основному металлу	0.8	25
	медь	1.2	200	- / -		0,65	60
6	Ст3	1.2	200	Переменный	по основному металлу	0.8	25
	Ст3	1.2	200	- / -		0.8	25
7	медь	1.2	350	- / -	по основному металлу	0.65	34
	медь	1.2	350	- / -		0.65	34
8	Ст3	1.2	350	- / -	по медному образцу	0.8	15
	медь	1.2	350	- / -		0.65	34



а



б

Рис.4. Микроструктура зоны сварки (x 250). а – сталь-сталь; б – сталь-медь

Кроме этого, диффузионные процессы в зоне сварки должны усиливаться за счет увеличения выхода на контактную поверхность подвижных дислокаций, позволяющих создавать дополнительные центры активации. При плотностях тока, вызывающих электропластический эффект, происходит примерно десятикратное увеличение плотности подвижных дислокаций, стремящихся выйти из металла по току [4]. Таким образом, обработка импульсами тока дает возможность получить дополнительные центры активации на обеих свариваемых поверхностях.

Определенные в работе условия обработки током свариваемых деталей являются нижней границей параметров (как по амплитудной плотности тока и длительности импульса, так и по удельной энергии обработки металла), которые обеспечивают образование сварного соединения.

С точки зрения электростимулированной пластической деформации на контактной поверхности полученные значения удельной электрической энергии обработки для стали (0,8 Дж/мм³) и меди (0,65 Дж/мм³) соответствуют нижней границе интервала удельных электрических энергий $q = (0,5-4,0)$ Дж/мм³, в котором проявляется ЭПЭ в металлах [4, 5]. При этом пластичность металла

возрастает во всем диапазоне энергий для углеродистых сталей, меди, титановых и алюминиевых сплавов.

Это делает исследованные в данной работе подход и способ осуществления диффузионной сварки металлов на воздухе перспективными как в плане расширения технологических возможностей, так и с точки зрения дополнительной активации диффузионных процессов в зоне сварки.

Выводы

1. Обработка свариваемых деталей импульсами тока большой плотности вызывает электростимулированную пластическую деформацию микронеровностей и приводит к существенному уменьшению зазора (до 0,5–1,0 мкм) между контактирующими поверхностями, что позволяет проводить дальнейшую обработку соединения на воздухе.

2. Качественная сварка образцов из однородных (сталь-сталь, медь-медь) и разнородных (медь-сталь) металлов обеспечивается при обработке образцов серией импульсов тока с амплитудной плотностью тока $j_m \geq 1,2 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2$, длительностью импульса $\tau_n \geq 200 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. При этом минимальная удельная энергия обработки металла в зоне сварки составляет $q_{ст} = 0,8 \text{ Дж/мм}^3$ для стальных и $q_{Cu} = 0,65 \text{ Дж/мм}^3$ для медных образцов.

3. Определенные в работе условия обработки деталей импульсным током по величине удельной энергии обработки металла соответствуют нижней границе интервала удельных энергий, в котором проявляется ЭПЭ в металлах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конюшков Г.В., Жевалев О.Ю., Коблов А.И., Котина Н.М. Возможности диффузионной сварки для получения соединений ферритов с металлами // Автомат. сварка. 1991. № 5. С. 54–55.
2. Юценко К.А., Несмих В.С., Дубовецкий И.В., Куценко И.В. Сварка керамики методом электрического взрыва проводника // Автомат. сварка. 1990. № 3. С. 32–36.
3. Шевчук Т.В., Дубовецкий И.В., Несмих В.С. и др. Влияние состава промежуточной прослойки на структуру и свойства соединений нитридной керамики при разрядно-импульсной сварке // Автомат. сварка. 1991. № 5. С. 66–69.
4. Спицин В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 160 с.
5. Беклемешев Н.Н., Баранов Ю.В., Доронин Ю.Л. и др. Влияние импульсного электрического тока на характеристики конструкционной прочности металлических материалов // Физика и химия обработки материалов. 1990. № 4. С. 108–112.
6. Половинко В.Д., Юрченко Е.С. Исследование влияния импульсов электрического тока большой плотности на диффузионную сварку металлов // VI Международ. школа-семинар. «Импульсные процессы в механике сплошных сред». г. Николаев, 2005: Тез. докл., г. Николаев: ИИПТ НАН Украины, 2005. С. 39–41.
7. Дацук П. Н., Зайнец С. Л., Комельков В. С. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. М.: Атомиздат, 1970. С. 472.
8. Демиденко Л.Ю., Онацкая Н.А., Юрченко Е.С. Прессово-термическое электрогидроимпульсное соединение труб с трубными решетками из высоколегированных сталей // Автомат. сварка. 2003. № 5. С. 53–54.
9. Самсонова Т.С., Терновский А.П., Каракозов Э.С. Особенности диффузионной сварки сплавов с дисперсионным упрочнением // Автомат. сварка. 1990. № 11. С. 19–22.
10. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. М.: Машиностроение, 1976. 359 с.
11. Рябцев И.А. Термодинамический анализ процессов, происходящих в зазорах многослойных герметичных пакетов при их сварке прокаткой / Автомат. сварка. 1987. № 1. С. 28–32.

Поступила 06.02.08

Summary

The results of welding homogeneous and heterogeneous metals in the hard state with the use of current impulses with large closeness are represented. The chart of treatment by a current providing the receipt of the welded connection at it heating in an air atmosphere is offered. Influence of alternate and unidirectional current on deformation the microasperities of contact surface in the area of welding is considered. The basic parameters of impulsive current and energy density of treatment the steel standards and the copper standards providing the receipt of the welded connection are rated.