

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО КОНТАКТА ПРИ СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСОВ ТОКА

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

Известно [1], что при любых способах сварки в твердом состоянии определяющая роль в образовании сварного соединения отводится пластической деформации, оказывающей существенное влияние на все стадии процесса. Для ее создания необходимо сжатие свариваемых поверхностей, при этом взаимодействующие материалы должны быть первоначально сближены на расстояние, соответствующее уровню физического взаимодействия, обусловленного ван-дер-ваальсовыми силами [2]. Этот этап сварки принято называть этапом образования физического контакта, схема его приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема образования физического контакта при действии сжимающего усилия на сварной образце

Рост площади физического контакта на начальных этапах формирования соединения происходит при преимущественном действии пороговых механизмов микропластической деформации. Однако такая деформация ограничена, так как напряжения в контакте снижаются, а приконтактный объем материала упрочняется, особенно это характерно для процессов, осуществляющихся при температурах ниже температуры рекристаллизации. В этом случае упрочнение приконтактного объема может достичь такого значения, что физический контакт прекращает развиваться. Поэтому необходимо применение эффективных способов воздействия на приповерхностный слой для уменьшения или предотвращения деформационного упрочнения приконтактного объема металла.

Перспективным в этом случае представляется использование импульсов тока с учетом способности электрического тока, введенного в зону деформации металлов, снижать их сопротивление деформированию и повышать пластичность, а также влиять на свойства материалов и поверхности твердых тел [3]. Сущность предложенного авторами способа сварки с применением импульсов тока заключается в том, что свариваемые металлы при температуре окружающей среды сжимают под давлением и через свою зону деформации пропускают импульсы тока большой плотности ($\sim 10^9$ А/м²) длительностью $\sim 10^{-4}$ с, затем образцы подвергают термообработке, в результате образуется сварное соединение по типу диффузионного, причем без применения специальной защиты свариваемых поверхностей от окисления [4].

Давление является одним из основных параметров процесса сварки металлов в твердом состоянии, основное его назначение в исследуемом способе – обеспечить пластическое деформирование микровыступов на контактных поверхностях, поскольку для интенсификации пластической деформации, стимулированной действием тока, необходимо, чтобы металл находился под напряжениями на уровне предела текучести [3]. Давление также способствует выравниванию соединяемых поверхностей, уменьшению размеров несплошностей в зоне соединения благодаря пластической деформации микронеровностей контактирующих поверхностей. При этом на этапе обработки током обеспечивается самогерметизация зоны сварки от окружающей среды, а при последующем нагреве образуется автовакуум, приводящий к самоочистке поверхностей и образованию сварного соединения.

Цель настоящей работы – исследовать влияние давления на образование физического контакта при сварке металлов в твердом состоянии для определения его величины, требуемой для пластического деформирования микровыступов на контактных поверхностях, обеспечивающего самогерметизацию зоны сварки при обработке ее импульсами тока.

Для исследования влияния давления на образование физического контакта при соединении металлов в твердом состоянии использовалась методика, основанная на измерении контактного электросопротивления (КЭС) зоны сварки соединяемых металлов в условиях, имитирующих процесс образования соединения [1].

Контактное электросопротивление зоны сварки $R_{зс}$ может быть выражено в первом приближении как

$$R_{зс} = (\rho_{уд} \cdot l_k) / F, \quad (1)$$

где $\rho_{уд}$ – удельное сопротивление металла при исследуемой температуре, Ом·м⁻¹; l_k – расстояние между потенциальными выводами, м; F – площадь контакта, м².

К изменению контактного электросопротивления в зоне сварки могут приводить следующие процессы:

- изменение площади контакта. Изменение контактного электросопротивления зоны сварки при исследуемых условиях будет зависеть в основном от изменения площади контакта;

- деформационное упрочнение поверхностных слоев в процессе смятия микровыступов при температурах ниже температуры рекристаллизации. Известно, что электрическое сопротивление возрастает при введении примесей и дефектов в решетку чистых металлов, так как любые искажения кристаллической решетки металлов приводят к рассеиванию электронов проводимости [1, 3]. Так как деформационное упрочнение распространяется на небольшую глубину, то можно ожидать, что его вклад в общее изменение контактного электросопротивления будет незначительным;

- изменение состава приповерхностного слоя при диффузии элементов с поверхности и из глубинных слоев образца. Вклад этого процесса в изменение электросопротивления возрастает с повышением температуры и становится существенным в температурной области выше температуры рекристаллизации. В нашем случае он не имеет места, поскольку пластическое деформирование осуществляется при температуре окружающей среды.

Таким образом, измерение КЭС зоны сварки позволяет не только изучать кинетику образования физического контакта, но и оценить вклад сопутствующих этому явлению процессов.

Измерение КЭС зоны сварки производилось нулевым методом по схеме двойного моста, приведенной на рис. 2. С помощью автотрансформатора 3 устанавливался требуемый измерительный ток, который для диапазона сопротивлений от 10^{-4} до 10^{-5} Ом составлял 10 А.

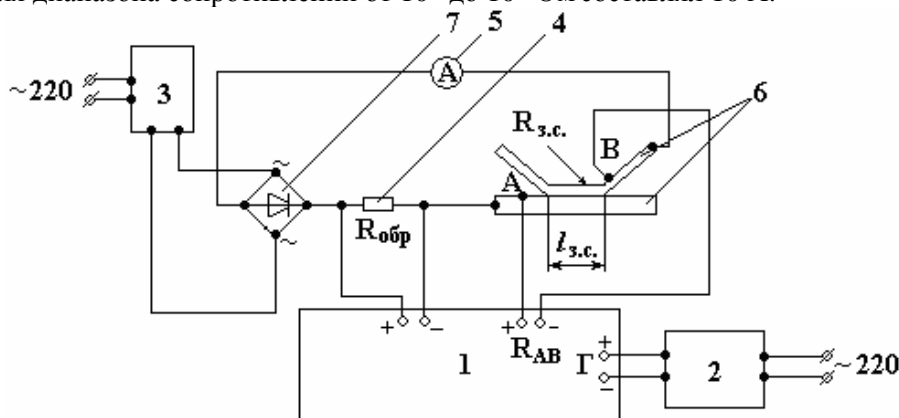


Рис. 2. Схема измерения контактного электросопротивления. 1 – мост постоянного тока МОД-61; 2 – гальванометр Р 325; 3 – автотрансформатор; 4 – образцовое сопротивление; 5 – вольтамперметр М 2018; 6 – измеряемые образцы; 7 – выпрямитель переменного тока

Электросопротивление R_{AB} между зажимами А и В (см. рис. 2), включающее в себя переходное контактное электросопротивление зоны сварки $R_{зс}$ и сопротивление участков контактирующих металлов между зажимами А и В, может быть выражено как

$$R_{AB} \cong R_{m1} + R_{m2} + R_{зс}, \quad (2)$$

где R_{m1} , R_{m2} – электросопротивления участков контактирующих металлов между зажимами, Ом; $R_{зс}$ – переходное контактное электросопротивление в зоне сварки, Ом.

Отсчет значения измеряемой величины электросопротивления R_{AB} проводился по показанию моста в момент равновесия, то есть когда ток в диагонали гальванометра отсутствовал. При этом погрешность показаний двойного моста, выраженная в процентах от номинального значения измеряемого сопротивления, не превышала $\pm 0,1\%$.

Для исключения влияния обычно неконтролируемых особенностей предварительной подготовки образцов (приводящих к изменению величины начального контактного электросопротивления) при анализе изменения КЭС, характеризующего развитие площади физического контакта в зависимости от давления, использовалась относительная величина КЭС (в процентах), которая определялась по отношению изменения контактного электросопротивления к начальному значению R_{AB}^0 :

$$\Delta R / R_{AB}^0 = (R_{AB} - R_{AB}^0) / R_{AB}^0, \quad (3)$$

где R_{AB} – электросопротивление между зажимами A и B , обусловленное воздействием технологических параметров, Ом; R_{AB}^0 – начальное электросопротивление между зажимами A и B , которое определялось при давлении, равном 5,0 МПа.

Экспериментальные исследования по влиянию давления на образование физического контакта при сжатии разнородных металлов пары «сталь 20 + медь М1» выполняли при температуре окружающей среды в интервале изменения давления от 10 до 100 МПа, то есть в диапазоне примерно от 0,1 до 0,9 предела текучести менее прочного металла (меди).

В качестве модельных образцов для сварки разнородных металлов с использованием импульсов тока были выбраны прямоугольные пластины длиной до 170 мм, шириной до 12 мм и толщиной до 2,5 мм, причем зона сварки, равная длине $l \approx 22$ мм, выбиралась посередине образца. 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 от 8 до 10 мкм, а контактная поверхность стальной пластины была полированной. Заведомо большую (по сравнению с обычно используемой в технологии) величину неровностей на медной пластине выбирали, учитывая, что образование физического контакта происходит в основном в результате микропластической деформации более мягкого материала [2], а также с целью предотвращения других возможных (кроме вызванного непосредственно деформацией) процессов, приводящих к образованию контакта. Затем обе пластины (стальную и медную) помещали в специальное приспособление и прикладывали расчетное давление, которое определяли как отношение усилия сжатия к номинальной площади соприкосновения образцов. Для повышения достоверности полученных результатов эксперименты для одного значения давления повторяли не менее трех раз. После каждого повышения давления делали выдержку в течение 5 мин и измеряли величину контактного электросопротивления.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 3 в виде зависимости изменения усредненной величины относительного контактного электросопротивления от давления.

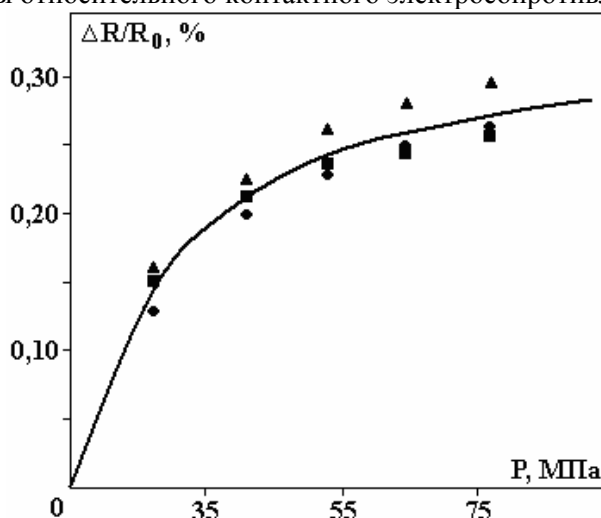


Рис. 3. Относительное изменение контактного электросопротивления зоны сварки в процессе развития физического контакта в зависимости от давления

Как видно из рис. 3, зависимость $\Delta R / R_0 = f(P)$ имеет нелинейный характер, причем с увеличением давления во всем исследованном диапазоне его изменения возрастает изменение от-

носительного КЭС, характеризующее увеличение площади физического контакта. Вначале при приложении давления ≤ 30 МПа наблюдается активная упругопластическая деформация микронеровностей, имеющая зависимость между изменением относительного КЭС и давлением, близкую к прямо пропорциональной. На этом этапе формирование физического контакта (см. рис. 1) происходит почти одновременно путем смятия микронеровностей и заполнения пустот растекающимся металлом, при этом имеют место рост и фиксация участков контакта. Совершенно очевидно, что при этом непрерывно уменьшается межслойный зазор, а также интенсивно вытесняются остаточные газы из зоны соединения.

При дальнейшем увеличении давления его роль в развитии физического контакта снижается, и при давлении $P \geq 50$ МПа градиент изменения электросопротивления резко уменьшается. Это обусловлено тем, что вначале давление в контакте (отношение усилия сжатия к фактической площади контакта) намного превышает расчетное давление (отношение усилия сжатия к номинальной площади контакта). Поэтому деформация и деформационное упрочнение в приконтактной зоне развиваются более интенсивно по сравнению с объемом металла. Рост площади физического контакта за счет деформации элементарных микровыступов на контактных поверхностях приводит, с одной стороны, к тому, что разница между давлениями (в контакте и расчетным) уменьшается, с другой – металл в приконтактной зоне упрочняется, в результате чего скорость деформации микровыступов резко снижается и физический контакт образуется с малой интенсивностью. По этой причине эффективность использования повышенного давления при сварке металлов в твердом состоянии уменьшается, хотя при этом абсолютная величина площади физического контакта несколько увеличивается.

Параллельно развитие площади физического контакта между сжатыми разнородными металлами при изменении давления в указанном выше диапазоне оценивали с помощью оптической металлографии при увеличении в 400 крат. При этом о развитии площади физического контакта судили по общей деформации рельефа поверхности медной пластины, которую определяли в процентах как отношение суммарной площади зоны растекания поверхностного рельефа к общей площади контактной зоны. Чем больше деформация, тем больше площадь физического контакта.

В результате экспериментов определено, что для пары металлов «сталь 20 + медь М1» величина давления от 35 до 50 МПа достаточна для пластического деформирования микровыступов на поверхности медной пластины и приводит к деформации рельефа поверхности от 40 до 50 процентов. При таком уровне локальных микродеформаций, как известно [2], в местах их образования обеспечивается достаточно плотный для сварки контакт. Применительно к исследуемому способу сварки это, очевидно, позволяет изолировать свариваемые поверхности от окружающей среды, в том числе и на внутренних участках с зазором, то есть создает возможность получения сварного соединения без применения вакуумирования или защитной среды.

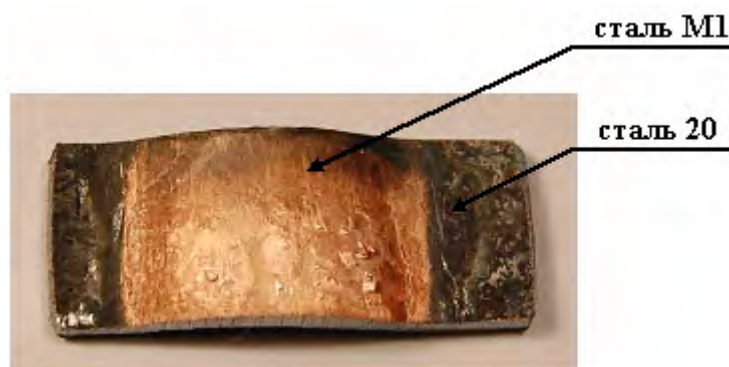


Рис. 4. Излом сварного соединения «сталь 20 + медь М1»

Экспериментальная проверка сварки в твердом состоянии с использованием импульсов тока была проведена на выбранных модельных образцах пары «сталь 20 + медь М1». Для этого поверхности пластин обезжировали ацетоном, осуществляли сжатие образцов при температуре окружающей среды (комнатной) в специальном приспособлении при расчетном давлении, равном 50 МПа. Затем через зону деформации пропускали импульсный ток с амплитудой плотности тока $J_m = 1,85 \cdot 10^9$ А/мм², длительностью $\tau = 3 \cdot 10^{-4}$ с, количество импульсов $N = 60$. После этого сжатые образцы подвергали термообработке при температуре 850⁰С в течение 20 мин в камерной электропечи СНОЛ 1,6-2,5.ИП-И4 для инициирования диффузионных процессов, обеспечивающих зарастание

пор и несплошностей в зоне контакта. С целью качественной оценки прочности соединений, а также определения протяженности и характера зоны сварки полученные сварные соединения подвергали механическим испытаниям на отрыв, которые осуществляли путем разрушения сварного соединения со стороны неприваренной части образца. Результаты испытаний показали, что сварка произошла по развитой поверхности всей зоны сжатия (рис. 4), сварное соединение разрушалось по основному металлу (меди М1), излом имел вязкий характер.

Таким образом, полученные результаты позволяют рекомендовать в качестве рационального интервала изменения давления для способа сварки металлов в твердом состоянии с использованием импульсов тока диапазон от 0,35 до 0,50 предела текучести менее прочного металла. Так как при этом еще велика интенсивность пластической деформации неровностей контактных поверхностей (что свидетельствует о достаточно высоком уровне напряжений), но уже развиваются процессы, тормозящие развитие физического контакта. При этом деформация рельефа поверхности составляет не менее 40%, что обеспечивает применительно к исследуемому способу сварки достаточно плотный контакт свариваемых поверхностей, позволяет изолировать их от окружающей среды и создает возможность получения сварного соединения без применения вакуумирования или защитной среды. Повышение давления свыше 0,50 от предела текучести металла можно считать нецелесообразным, учитывая незначительное изменение КЭС, характеризующее развитие площади физического контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Каракозов Э.С.* Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. 264с.
2. *Каракозов Э.С.* Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
3. *Троицкий О.А.* Физические основы и технология обработки современных материалов. В 2-х т. Т. 1. Теория, технология, структура и свойства / О.А.Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. Москва-Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2004. 590 с.
4. Патент 79181 Украина. МПК (2006) В23К 31/02. Способ диффузионной сварки металлов / Половинко В.Д., Юрченко Е.С., Вовченко А.И. Опубл. 25.05.07. Бюл. № 7. 5с.

Поступила 19.03.10

It is shown by the example of welding of heterogeneous metals of pair “steel 20 + copper M1” in solid state with use of current pulses that the changes in pressure within the range from 0.35 to 0.5 from the yield point of the less strong metal is more expedient. It is determined that in this case the level of local microdeformations makes from 40 to 50%, which provides a rather tight contact between the weldable surfaces as applied to the studied method of welding, thus allowing in the process of further treatment to insulate them through the current from the surrounding medium, and creates the possibility to get a welding junction without vacuumizing or protective medium, which is confirmed by an experimental check-up.