



## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Л. Ю. ДЕМИДЕНКО, Н. А. ОНАЦКАЯ, В. Д. ПОЛОВИНКА

Ин-т импульсных процессов и технологий НАНУ. 54018, г. Николаев, просп. Октябрьский, 43а.

E-mail: iipt@iipt.com.ua

В настоящее время для качественного соединения разнородных металлов все большее распространение получают способы сварки давлением. В Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины разработан новый способ сварки металлов в твердом состоянии с использованием импульсов тока. Сущность его заключается в том, что свариваемые металлы при температуре окружающей среды сжимают под давлением и для интенсификации пластической деформации на стадии образования физического контакта через зону деформации пропускают определенное количество импульсов тока с амплитудой плотности не менее  $1,2 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup> длительностью не менее  $2 \cdot 10^{-4}$  с. При этом взаимная деформация поверхностного рельефа обеспечивает достаточно плотный контакт свариваемых поверхностей, что позволяет изолировать их от окружающей среды и при последующем нагреве образуется сварное соединение по типу диффузионного без применения специальной защиты свариваемых поверхностей от окисления. Цель настоящей работы — исследование влияния температуры термомеханической обработки на качество соединений при сварке разнородных металлов в твердом состоянии с использованием импульсов тока большой плотности. При этом используют такие методы исследований, как механические испытания на срез, оптическую металлографию, микрорентгеноспектральный анализ. В результате экспериментальных исследований установлено, что для обеспечения качественного сварного соединения сталь 20 + медь М1 наиболее благоприятной является температура 800 °С, так как при этом в зоне соединения отсутствуют несплошности, а в самом металле сохраняется четко выраженная исходная структура. Библиогр. 9, табл. 3, рис. 5.

*Ключевые слова:* сварные соединения разнородных металлов, температура термомеханической обработки, импульсы тока большой плотности, самогерметизация межконтактной зоны, металлографические исследования, механические испытания на срез

В современном промышленном производстве для изготовления сварных изделий характерно применение разнородных по своим свойствам металлов и сплавов [1, 2]. Это позволяет наиболее полно использовать специфические свойства каждого из них, снижать расход дорогих и дефицитных металлов, изготавливать изделия с высокими эксплуатационными качествами и уменьшать их массу. В этой связи актуальна разработка новых, эффективных и малоэнергоёмких технологических процессов получения качественных сварных соединений из разнородных металлов.

В Институте импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины разработан новый способ сварки металлов в твердом состоянии с применением импульсов тока [3], который является разновидностью сварки давлением с подогревом. Сущность его заключается в том, что свариваемые металлы при температуре окружающей среды сжимают под давлением и для интенсификации пластической деформации на стадии образования физического контакта через зону деформации пропускают определенное количество импульсов тока с амплитудой плотности не менее  $1,2 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup> длительностью не менее  $2 \cdot 10^{-4}$  с. При этом взаимная

деформация поверхностного рельефа обеспечивает достаточно плотный контакт свариваемых поверхностей, что позволяет изолировать их от окружающей среды и при последующем нагреве образуется сварное соединение без применения специальной защиты свариваемых поверхностей от окисления [4].

Для сварки разнородных металлов предложенным способом были выбраны сталь 20 и медь М1, поскольку они, во-первых, широко применяются при изготовлении технических изделий в электротехнике, транспорте, машиностроении, во-вторых, значительно различаются по своим физико-механическим свойствам и кристаллографическим характеристикам. Взаимная растворимость этих металлов сравнительно небольшая и зависит от температуры [5], поэтому представлялось целесообразным исследовать ее влияние на качество полученных сварных соединений.

Целью настоящей работы является исследование влияния температуры термомеханической обработки (ТМО) на качество соединений при сварке разнородных металлов в твердом состоянии с использованием импульсов тока большой плотности.



**Материалы и методика проведения эксперимента.** В качестве модельных образцов для сварки разнородных металлов с использованием импульсов тока большой плотности были выбраны прямоугольные пластины длиной 170, шириной 12 и толщиной 2,5 мм, причем зона сварки, равная длине  $l \approx 22$  мм, выбиралась посередине образца (рис. 1).

Непосредственно перед сваркой осуществляли механическую подготовку поверхностей пластин, заключающуюся в их шлифовке до высоты гребешков (микронеровностей)  $H_0 = 5 \dots 6$  мкм. Затем поверхности пластин обезжировали ацетоном. Пластическую деформацию микровыступов на контактных поверхностях осуществляли при температуре окружающей среды (комнатной) сжатием образцов в специальном приспособлении при расчетном номинальном давлении, равном 50 МПа. Обработку импульсным током зоны контакта сжатых пластин осуществляли путем пропускания тока по одной стальной пластине, параметры импульсного тока были такими же, как в работе [4], а именно: амплитуда плотности тока  $J = 1,85 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>; длительность импульса (затухающая синусоида)  $\tau \approx 3 \cdot 10^{-4}$  с; количество импульсов  $N = 90$ , частота следования импульсов 0,5 Гц.

Образцы, прошедшие обработку импульсным током, вместе с приспособлением помещали в камерную электропечь для последующего нагрева.

Для определения влияния температуры ТМО на качество полученных сварных соединений их нагревали в печи до температуры сварки, которую согласно [6] выбирали в диапазоне 0,5...0,7 от температуры плавления, т. е. при 750, 800 и 850 °С и выдержке в течение 20 мин при указанной температуре. Количество образцов для каждого уровня температур — не менее трех.

О качестве соединений судили по результатам металлографических исследований и механических испытаний темплетов, вырезанных из зоны контакта сварных образцов (рис. 1). При этом каждый темплет разрезали в поперечном сечении. Одну часть темплетов использовали для металлографических исследований, другую — для механических испытаний.

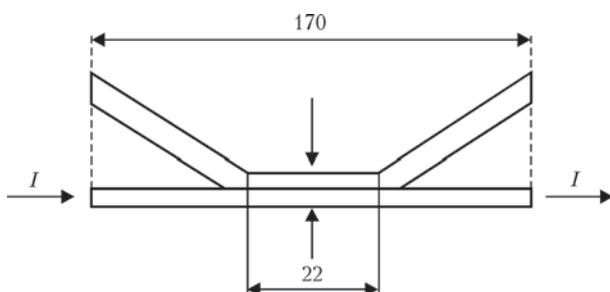


Рис. 1. Схема сжатия образцов для обработки импульсами тока

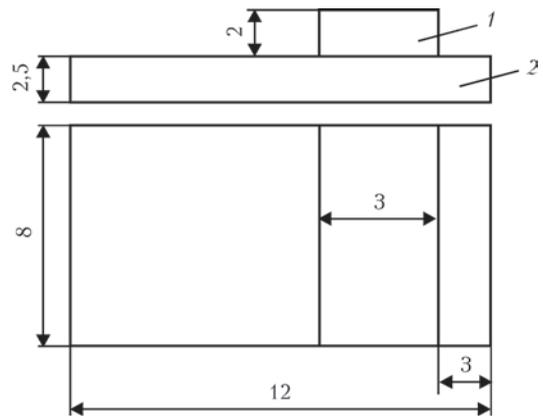


Рис. 2. Схема образца для испытаний на срез: 1 — участок медной пластины; 2 — стальная пластина

Микрошлифы для металлографических исследований изготавливали перпендикулярно к плоскости контакта. Подготовка шлифов к исследованиям состояла из механической шлифовки, полировки и последующего травления в 4 % спиртовом растворе нитала [7].

Качество сварного соединения предварительно оценивали по состоянию границы вдоль линии соединения (на наличие несплошностей). При этом оценку состояния границы производили по ее ширине, определяемой с помощью металлографического микроскопа «Микротех» модели ММО-1600 при 400-кратном увеличении. При наличии несплошностей по линии соединения, представляющих собой микронесплавления, производили их измерение при 1000-кратном увеличении в 100 точках, равномерно распределенных вдоль линий соединения. По их результатам вычисляли долю (в процентном выражении) по линии соединения тех или иных значений ширины границы.

Распределение (диффузия) химических элементов исследовали методом микрорентгеноспектрального анализа в поперечном сечении от основного металла до линии соединения, а также вдоль линии соединения со стороны меди.

Механические испытания на прочность (на срез) проводили согласно ГОСТу 10885–85 с целью определения напряжений, при которых происходит деформация сдвига с разрушением сварного соединения по линии сварки. Для этого из части темплетов изготавливали образцы для испытаний (рис. 2).

Испытания проводили на лабораторном стенде, предназначенном для исследования статических характеристик материалов и разработанном в ИИПТ НАН Украины, с помощью приспособления, схема которого приведена на рис. 3. Это приспособление позволяет при приложении к направляющим и растягивающих усилий  $F_s$  обеспечить на испытываемой площадке образца напряжения чистого сдвига. Нагружение образцов проводили

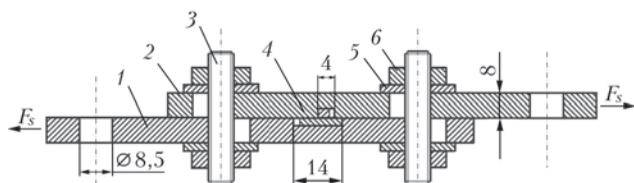


Рис. 3. Схема приспособления для испытаний образцов на срез: 1, 2 — соответственно нижняя и верхняя направляющая; 3 — шпилька; 4 — сварной образец; 5 — шайба; 6 — гайка

ступенчато с выдержкой на каждой ступени в течение 3 мин.

Прочность соединений оценивали по напряжениям среза  $\tau_{cp} = F_{cp} / S_{cp}$ , где  $F_{cp}$  — усилие среза испытуемого участка, кН;  $S_{cp}$  — площадь срезаемого участка, мм<sup>2</sup>.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.**

Результаты ранее проведенных исследований изменений поверхностного рельефа под действием импульсного тока по указанной выше схеме пропускания тока с помощью сканирующего электронного микроскопа марки СЭМ 515 фирмы «Philips» (Голландия) показали, что обработка импульсами тока большой плотности предварительно сжатых пластин металлов сталь 20 + медь М1 приводит к значительной деформации их поверхностного рельефа, в результате чего обеспечивается образование площади физического контакта от 60 до 80 % общей площади контактной поверхности [4]. Взаимная деформация поверхностного рельефа применительно к исследуемому способу сварки обеспечивает достаточно плотный контакт свариваемых поверхностей, что позволяет изолировать их от окружающей среды и создает возможность при последующем нагреве получить сварное соединение без применения защитной среды, что подтверждено экспериментально в той же работе.

Повышение температуры на стадии объемного взаимодействия необходимо для искусственного увеличения пластичности свариваемых металлов и ускорения диффузионных процессов. Кроме того, термообработка интенсифицирует диффузионное растворение кислорода из приповерхностного слоя в глубь металла, в результате окисированный слой рассасывается и перестает играть роль барьера для выхода дислокаций в зону соединения. Скорости активации и схватывания контактных поверхностей при этом увеличиваются, и происходит развитие взаимодействия соединяемых металлов как в плоскости контакта с образованием прочных металлических связей, так и в объеме зоны контакта.

Усредненные результаты измерений напряжений среза сварных соединений, полученных при разных температурах, представлены в табл. 1.

Для сравнения прочности сварных соединений с основным металлом образец из основного металла (в данном случае меди), подобный свар-

**Таблица 1. Результаты механических испытаний на срез теплетов сварного соединения сталь 20 + медь М1**

Температура термообработки $T, ^\circ\text{C}$	Напряжение среза $\tau_{cp}, \text{МПа}$	Относительное напряжение среза $\bar{\tau}_{cp}$
750	176,0±6,2	0,96
800	180,7±3,5	0,98
850	174,2±5,1	0,95

ному (см. рис. 2), подвергали термодформационному воздействию, имитирующему условия сварки, и испытывали по аналогичной методике. Таким образом, определяли относительное напряжение среза  $\bar{\tau}_{cp}$  для всех исследуемых температур сварки

$$\bar{\tau}_{cp}(T) = \tau_{cp}(T) / \tau(T),$$

где  $\tau_{cp}(T)$  — напряжение среза, полученного при температуре сварки, МПа;  $\tau(T)$  — прочность на срез основного металла после термического воздействия по режиму сварки, МПа.

Расчетные значения относительного значения напряжения среза приведены в табл. 1.

Согласно результатам механических испытаний установлено, что при изменении температуры сварки от 750 до 850 °С прочность на срез полученных сварных соединений изменяется в узком интервале от 174,2 до 180,7 МПа, что соответствует от 0,95 до 0,98 прочности меди.

Микроструктуры зон полученных сварных соединений представлены на рис. 4, а результаты измерения ширины границы и ее доли по линии соединения — в табл. 2. Из таблицы видно, что повышение температуры ТМО приводит не только к уменьшению ширины границы, но и к увеличению количества точек по линии соединения, в которых зафиксирована минимальная ее ширина. Так, при температуре ТМО 750 °С 8 % исследованной длины линии соединения имеют дефекты размером от 0,5 до 1,0 мкм, остальные 92 % имеют ширину границы менее 0,5 мкм. При более высоких температурах (800 и 850 °С) дефекты типа пор, несплошностей в зоне соединения уже отсутствуют, а сама зона соединения представляет собой ориентированную в плоскости первоначального контакта межзеренную границу (рис. 4, б, в).

**Таблица 2. Ширина границы и ее процентное содержание по линии соединения при разных температурах ТМО**

Температура термообработки $T, ^\circ\text{C}$	Ширина границы, мкм		
	1,0	~ 0,5	< 0,5
750	7	1	92
800	-	-	100
850	-	-	100

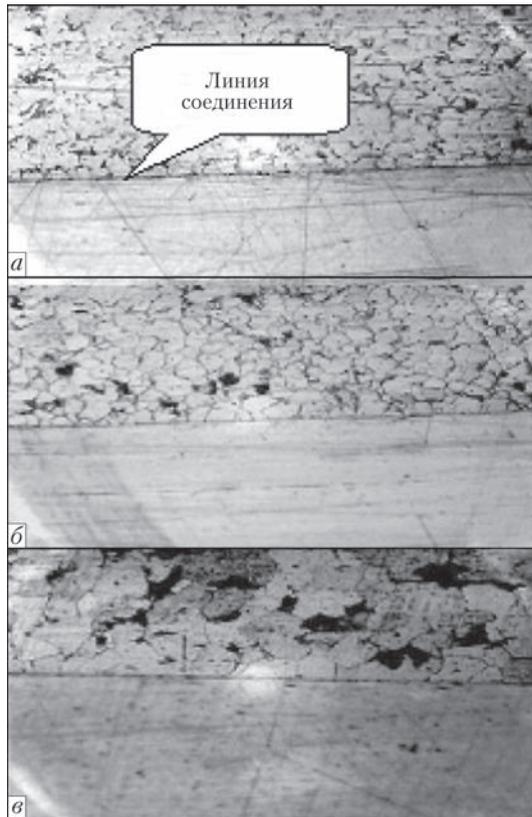


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 400$ ) зон сварных соединений сталь 20 + медь М1 при  $T = 750$  (а), 800 (б) и 850 °С (в)

Однако, сопоставляя микроструктуры полученных сварных соединений, следует отметить, что повышение температуры ТМО до 850 °С приводит к росту зерен в стали 20 как в зоне соединения, так и в основном металле (рис. 4, в), что нежелательно, поскольку может привести к снижению прочностных характеристик сварного соединения.

На основании результатов металлографических исследований можно сделать вывод, что температура ТМО 800 °С наиболее предпочтительна для обеспечения качественного сварного соединения сталь 20 + медь М1, поскольку при этом

Таблица 3. Распределение химических элементов вдоль линии соединения со стороны меди ( в %) на глубине около 10 мкм

Номер точки	Cu	Fe	Cr	Mn	Ni
1	99,60	0,38	-	-	0,02
2	97,82	2,12	0,06	-	-
3	96,84	2,74	-	0,11	0,32
4	96,82	3,14	-	0,03	0,02
5	97,22	2,45	-	0,13	0,2
6	96,40	3,27	0,12	0,02	0,22
7	96,85	3,08	-	-	0,07
8	96,56	3,13	0,02	0,05	0,25

в зоне соединения отсутствуют несплошности, в самом металле сохраняется четко выраженная исходная структура, при этом зона соединения представляет собой ориентированную в плоскости первоначального контакта межзеренную границу.

Проведенный микрорентгеноспектральный анализ характера распределения основных химических элементов в поперечном сечении центральной области сварного образца, полученного после ТМО при температуре 800 °С в течение 20 мин, свидетельствует о том, что в приконтактной зоне соединения изменяется химический состав от 100 % Fe (или Cu) к 100 % Cu (или Fe) (рис. 5). При этом глубина проникновения меди (концентрацией до 1 %) в металл стали 20 около 15 мкм от линии соединения, а железа в медь примерно до 13 мкм. Полученные результаты полностью согласуются с современными представлениями о том, что для металлов с ограниченной взаимной растворимостью характерно появление диффузионных зон на границе соединения [8]. Их образование связано с тем, что в железо через границу раздела в результате определенной растворимости проникает (диффундирует) некоторое количество атомов меди. Аналогично в медь диффундирует некоторое количество атомов железа (табл. 3).

Результаты, представленные в табл. 3 и на рис. 5, показывают, что вдоль линии соединения и в поперечном сечении образуются зоны твердых растворов как со стороны стали 20, так и со стороны меди М1, что свидетельствует о протекании процессов межатомного взаимодействия контактирующих поверхностей. При этом в этих зонах не обнаружены фазовые образования, способные привести к охрупчиванию сварного соединения.

Таким образом, исследуемый способ сварки позволяет получить качественные сварные соединения сталь 20 + медь М1 при более низких термомеханических параметрах, чем при традиционной диффузионной сварке, причем без применения специальной защиты свариваемых поверхностей от окисления, например, вакуумирования или использования контролируемой

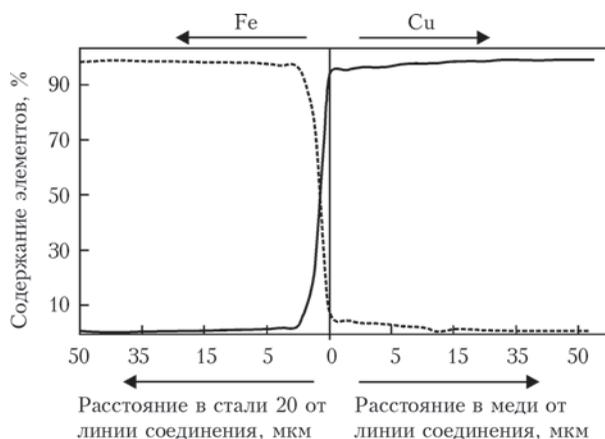


Рис. 5. Характер распределения основных химических элементов в поперечном сечении центральной области сварного образца сталь 20 + медь М1 после ТМО при  $T = 800$  °С



атмосферы из инертного газа. Изоляция зоны сварки от окружающей среды при сварке с использованием импульсов тока 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 оксидных пленок [9] и образованию сварного соединения.

### Выводы

1. Для сварки разнородных материалов сталь 20 и медь М1 в твердом состоянии с использованием импульсов тока наиболее благоприятной является температура ТМО 800 °С, так как при этом в зоне соединения отсутствуют дефекты типа несплошностей, а в самом металле сохраняется четко выраженная исходная структура.

2. Показано, что вдоль линии соединения в поперечном сечении образуются зоны твердых растворов как со стороны стали 20, так и со стороны меди М1. При этом в этих зонах не обнаружены фазовые образования, способные привести к охрупчиванию сварного соединения.

3. Результаты механических испытаний свидетельствуют, что полученные сварные соединения имеют достаточно высокую прочность на срез, сопоставимую с прочностью основного металла.

1. Миддельдорф К., Д. фон Хофе. Тенденция развития технологий соединения материалов // Автомат. сварка. – 2008. – № 11. – С. 39–47.
2. Reisinger U., Stein L., Steiners M. Stahl-Aluminium-Mischverbindungen: Schweißen oder Löten? Die Kombination zweier etablierter Fügetechnologien macht Unmögliches möglich // Schweißen und Schneiden. – 2010. – 62, № 5. – S. 278–284.
3. Пат. 79181 Україна. МПК В23К 31/02. Спосіб дифузійного зварювання металів /В. Д. Половинка, Є. С. Юрченко, О. І. Вовченко. – Опубл. 25.05.07, Бюл. № 7.
4. Вовченко А. И., Демиденко Л. Ю., Онацкая Н. А. Интенсификация пластической деформации поверхностей металлов под действием импульсов тока при сварке давлением // Міжвуз. збірник «Наукові нотатки». – Луцьк, 2011. – 32. – С.63–68.
5. Kurt A., Uygun E., Mutlu E. The effect of allotropic transformation temperature in diffusion-welded low-carbon steel and copper // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2006. – 28, № 1. – P. 39–52.
6. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов. – М.: Машиностроение, 1976. – 312 с.
7. Коваленко В. С. Металлографические реактивы. – М.: Металлургия, 1973. – 78 с.
8. Каракозов Э. С. Соединение металлов в твердой фазе. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
9. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Саенко В. Я. Самопроизвольная очистка металла от оксидных пленок // Докл. АН СССР. – 1980. – 159, № 1. – С. 1117–1118.

Поступила в редакцию 05.05.2014

## Компания «Hypertherm» представила новый резак специального применения

Компания «Hypertherm» представила свои продукты на крупнейшей в мире выставке оборудования для работы с тонколистовым металлом «EuroBLECH2014» (ноябрь 2014 г.). Посетители выставки высоко оценили презентацию резака специального применения для систем HPRXD и демонстрацию работы систем водоструйной резки в реальном времени.

Компания разрабатывает и производит передовые системы плазменной резки, применяющиеся в самых различных отраслях, например, судостроения, машиностроения и ремонте авто-



мобилей. В семейство продуктов компании входят ручные и механизированные системы плазменной и лазерной резки металлов, расходные детали, средства перемещения и регулировки высоты с ЧПУ, а также программное обеспечение резки. Системы производства «Hypertherm» имеют высокую репутацию, что обеспечивает повышение производительности и рентабельности для десятков тысяч предприятий. Репутация компании



в области инноваций плазменной резки ведет свой отсчет с 1968 г., когда в «Hypertherm» была изобретена плазменная резка с впрыском воды. Компания находится в совместном владении более чем 1200 партнеров, имеет дилерскую сеть и ведет операции по всему миру.