

ПЛАКИРОВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИСТОВ ТИТАНА МЕДЬЮ

А. А. Бердыченко, Г. А. Вольферц, Л.Б. Первухин

Приведены результаты исследований, на основании которых разработана технология сварки взрывом крупногабаритных листов биметалла медь-титан. Заполнение аргоном сварочного зазора позволяет решить проблему сварки крупногабаритных листов титана с медью со стабильно высоким качеством сварки по всей поверхности листа. Разработана опора, позволяющая плакировать листы металла не большой толщины с минимальными деформациями.

Ключевые слова: биметалл, сварка взрывом, защитная атмосфера, титан, медь.

Высокая коррозионная стойкость титана обуславливает его применение при изготовлении оборудования, применяемого в электролитическом процессе получения ряда цветных металлов. Однако его высокое электрическое сопротивление приводит к потерям электроэнергии, а при необходимости обеспечить одинаковую плотность тока на большой поверхности электрода возникают технологические и конструктивные трудности. Так известно, что оптимальным материалом для изготовления барабан-катода электролизёра медной тонкомерной фольги является титан. Промышленные барабан-катоды имеют диаметр порядка 900 мм и длину порядка 1200 мм. Качество получаемой на них фольги не в последнюю очередь зависит от равномерности плотности тока на поверхности барабан-катода. Применение механических контактов при передаче электроэнергии от медных шин к титановым электродам влечёт за собой излишние потери электроэнергии, которые растут со сроком эксплуатации оборудования из-за выхода механических контактов из строя вследствие их высокого сопротивления. Авторы работы [1], подтверждая свой вывод трёхлетним сроком эксплуатации токонесущих переходников из биметалла медь-титан на Московском медеплавильном заводе, утверждают, что применение таких токоподводов позволяет уменьшить падение напряжения на ваннах электролизёров на 10 % по сравнению с серийными, имеющими механический контакт между медью и титаном и снизить процент брака при получении катодных основ за счёт равномерности осаждения меди по площади матрицы в 5 раз.

В связи с изложенным, стояла задача разработки технологии изготовления листа

биметалла титан-медь для изготовления обечайки барабан-катода электролизёра размером 15×1500×3000 мм при толщине титана 10 мм и меди 5 мм.

Параметры сварки взрывом биметалла титан-медь оптимизировали при плакировании пластин титана ВТ 1-0 размером 10×200×300 мм медью М1р толщиной 5 мм. Эксперименты показали, что оптимальным режимом сварки взрывом такого биметалла были следующие параметры: скорость точки контакта 2000–2100 м/с, энергия пластической деформации 1,3 МДж/м², угол соударения 8–10°. Такие физические параметры достигаются применением в качестве взрывчатого вещества смеси аммонита 6ЖВ с аммиачной селитрой в соотношении 1:2, при параметре $r = 0,6–0,8$ и сварочном зазоре равном 8 мм. Сварное соединение при таком режиме сварки имело волнообразный характер с небольшими вихревыми зонами (рисунок 1а). Микротвёрдость вихревых зон составляла 3000–3500 МПа. В них редко встречались мелкие раковины и поры. Прочность слоёв на отрыв составляла 320–400 МПа, что приблизительно равно прочности меди в наклёпанном состоянии.

Отжиг биметалла при температуре 700 °С в течении трёх часов снизил прочность соединения до 150–200 МПа. Вместе с тем на границе соединения появилась прослойка интерметаллида толщиной 4–5 мкм, а гребни волн со стороны меди приобрели более тёмный оттенок (рисунок 1б) и имели микротвёрдость 2000–2500 МПа. Это явление, видимо, связано с диффузией титана в медь.

Снижение прочности сварного соединения и изменения его структуры не повлияли на технологические свойства биметалла. Он

успешно проходил операции правки и вальцовки.



а



б

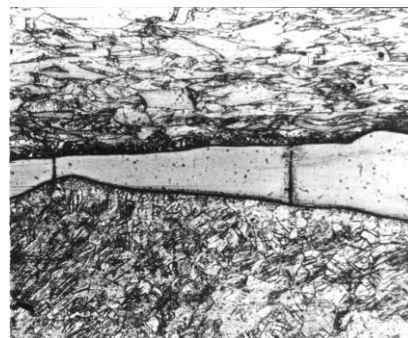


в

Рисунок 1 – Структура сварного соединения титан-медь, полученного сваркой взрывом на образцах размером 10×200×300 мм, где а – после сварки, б, в – после отжига при температуре 700 °С; а и б ×100, в ×500

Электрические свойства биметалла так же не пострадали в связи с появлением интерметаллидной прослойки, так как присутствие интерметаллидов уменьшает сопротивление переходной зоны биметалла сталь-титан [1]. Исследования структуры сварного соединения показали, что наряду с незначительным ростом параметров волн с удалением от начала процесса сварки начинает проявляться «перерезание» гребней волн в меди, что сопровождается снижением прочности сварного соединения. На расстоянии

1,5–1,8 м от начала процесса сварки соединение переходит в безволновое с прослойкой не травящейся структуры, содержащей большое количество микропор и пересекаемой трещинами, расположенными перпендикулярно свариваемым поверхностям. Толщина прослойки в конце образца достигает 100–150 мкм (рисунок 2а). Микротвёрдость материала прослойки составляет 3000–4000 МПа. Исследование элементного состава этой прослойки, проведённые на рентгеновском микроанализаторе MAP-2, показали, что она состоит из 32 % титана и 68 % меди.



а



б

Рисунок 2 – Микроструктура сварного соединения титан-медь на расстоянии 2 м от начала процесса сварки (а), ×100; и структура излома этого соединения (б), ×6

Аналогичные трудности и изменения характера сварного соединения возникали при плакировании титаном крупногабаритных листов стали и сварке взрывом длинных сварных соединений титан-титан [2, 3]. Прослойки такой толщины и структуры не наблюдаются при сварке коротких сварных соединений и вряд ли могут возникать при соударении свариваемых поверхностей в области точки контакта. Появление их наблюдается, в основном, при сварке взрывом крупногабаритных листов биметалла, один из слоёв которого титан. Причиной образования прослоек является тепловое действие воздушной ударной волны, которая в процессе сварки

движется по сварочному зазору впереди точки контакта. Источником тепла при этом является не только энергия ударно-сжатого газа, но и энергия, выделяемая при окислении титана [3].

Способы преодоления этих явлений сводятся к уменьшению длины сварки или заполнению сварочного зазора (объёма между свариваемыми поверхностями перед сваркой) инертным газом (гелий или аргон) [3]. Уменьшение длины сварки можно достигнуть посредством инициирования взрывчатого вещества из центра заряда или посредством организации распространения плоского фронта детонации заряда взрывчатого вещества вдоль короткой стороны плакируемого листа. Применение первого способа не представляет большого труда и хорошо зарекомендовало себя при плакировании толстых листов металла, однако применение его для плакирования крупногабаритных листов толщиной 10 мм приведёт к трудноисправимой конусообразной деформацией с вершиной в центре листа (под точкой инициирования заряда взрывчатого вещества).

Экспериментальные образцы, сваренные плоским фронтом детонации заряда взрывчатого вещества вдоль короткой стороны плакируемого листа, размер которой составлял 1400 мм, не имели участков сварного соединения со сплошной прослойкой, подобной представленной на рисунке 2а. Однако на расстоянии более 1 м от начала процесса сварки наблюдалось снижение прочности соединения. Сварное соединение здесь имело неустойчивых волнообразный характер, переходящий иногда в безволновое соединение с неравномерной прослойкой толщина которой достигала 50 мкм (рисунок 4).



Рисунок 3 – Структура сварного соединения титан-медь, полученного сваркой взрывом при распространении процесса детонации ВВ вдоль короткой стороны листа, $\times 100$

Заполнение сварочного зазора аргоном при плакировании крупногабаритных листов биметалла в полевых условиях, на первый взгляд, вызывает трудности технологического характера. Однако, в процессе работы была создана технология, позволяющая решить эту проблему [4]. Сваренные по разработанной технологии образцы биметалла имели стабильно высокое качество соединения по всей площади сварки. Изменения структуры сварного соединения с удалением от начала процесса сварки и образования соединения с прослойкой интерметаллида не наблюдалось (рисунок 4).

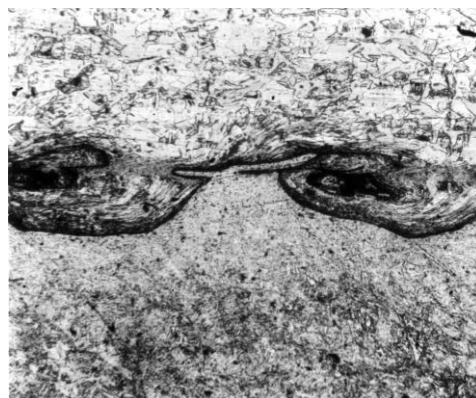


Рисунок 4 – Структура сварного соединения титан-медь, полученного сваркой взрывом в среде аргона, на расстоянии 3 м от начала процесса сварки, $\times 100$

Положительное влияние заполнения сварочного зазора аргоном доказывает то, что источником тепла, разогревающим свариваемые поверхности перед их соударением, является не только и не столько энергия ударно-сжатого газа, движущегося впереди точки контакта, а экзотермическая реакция взаимодействия кислорода и азота воздуха с титаном. В противном случае заполнение сварочного зазора аргоном не дало бы положительного результата, так как он имеет большую плотность, чем воздух, в связи с чем, температура в ударной волне, распространяющейся в нём выше, чем в воздухе.

Параллельно проблеме разработки технологии сварки взрывом крупногабаритных листов биметалла титан-медь со стабильно высоким качеством сварного соединения решалась проблема плакирования крупногабаритных, площадью порядка нескольких квадратных метров, листов биметалла толщиной 10–15 мм с минимальными деформациями. Деформация свариваемых взрывом листов,

как известно, зависит в основном от материала и вида опоры. В ходе разработки технологии опробовали опоры из грунта, песка, щебня, металлической дробь, стального листа, стального листа с прослойкой песка и сварку в подвешенном состоянии. Результаты плакирования на этих опорах показали, что минимальную остаточную деформация имели листы биметалла, плакирование которых производили на металлической дробь, стальном листе толщиной 30–50 мм и сталь-

ном листе толщиной 80–100 мм с прослойкой из песка между ним и плакируемым листом. Однако недопустимые глубокие вмятины от металлической дробь, возникающие на поверхности плакируемого листа при использовании её в качестве опоры, невозможность повторного применения стального листа без термической обработки и правки делает применение этих опор не эффективным.

Таблица – Виды опор и результаты плакирования на них крупногабаритных листов металла толщиной 10–15 мм

Вид опоры	Прогиб плакируемого листа, мм/м	Примечание
Грунт, песок, щебень	20–30	Большая неравномерность деформации; затруднена правка
Легко разрушаемая опора (подвеска плакируемого листа в воздухе)	30–50	Большая неравномерность деформации; правка невозможна
Металлическая дробь	5–10	Недопустимые вмятины на обратной стороне плакируемого листа глубиной 1,0–1,5 мм
Стальной лист толщиной 30–50 мм	5–10	Повторное применение опоры невозможно из-за деформации и разрушений; большой расход металла
Стальной лист толщиной 80–100 мм со слоем песка между ним и плакируемым листом толщиной 15–20 мм	5–10	После двух-трёх плакирований необходима термическая обработка; в зимнее время необходим подогрев до температуры 100–200 °С
Стальной лист толщиной 0,3–0,5 толщины плакируемого листа, расположенный на песчаной насыпной опоре высотой 20–40 толщин плакируемого листа	5–10	Возможно повторное использование стального листа после отжига и правки; малый расход стали

Исследование влияния опоры на деформацию плакируемого листа, представленные в таблице, показали, что при плакировании на мягкой песчаной опоре лист сваренного биметалла деформируется выпуклостью вверх, а при жёсткой стальной опоре – выпуклостью вниз. Следовательно, варьированием жёсткости опоры можно добиться минимальной деформации плакируемых листов. Основываясь на этом принципе, была разработана опора, позволяющая при минимальной деформации свариваемых листов биметалла достичь долговечности стальной подкладки и уменьшить расходы стального листа, идущего на неё.

Жёсткость опоры в экспериментах изменяли варьированием толщины стальной подкладки, располагаемой на мягкой песчаной

опоре. Выявлено, что оптимальная толщина стальной подкладки равна 0,3–0,5 толщины плакируемого листа, а песчаной засыпки 20–40 толщин плакируемого листа. Такое соотношение размеров даёт возможность получить крупногабаритные листы биметалла толщиной 10–20 мм с деформациями 5–10 мм на погонный метр, позволяющими подвергать их правке на листопрямильной машине. Стальные подкладки не разрушаются в процессе плакирования. Их деформации не превышают деформаций листов биметалла, получаемых с их использованием (рисунок 5). После отжига и правки они могут быть использованы снова.



Рисунок 5 – Стальная подкладка после сварки взрывом листа биметалла титан-медь толщиной 20 мм

Таким образом, заполнение сварочного зазора аргоном позволило получить сваркой взрывом листы биметалла титан-медь размером 10×500×3200 мм со стабильно высоким качеством сварного соединения по всей площади сварки, а применение жёсткой опоры из стального листа, расположенного на мягкой песчаной опоре, дало возможность получить лист биметалла с минимальными деформациями. Качество такого биметалла позволяет после отжига при температуре 500–600 °С в течении 1 часа подвергать его правке, вальцовке и механической обработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наумович, Н. В. Исследование влияния зоны соединения биметалла медь-титан на эксплуатационные свойства токоведущих проводников [Текст] / Н. В. Наумович, Л. Б. Демьянович,

Г. Г. Горанский // Поршковая металлургия: Сб. статей. Вып. 5 – М.: Высшая школа – Минск – 1981. – с. 102–105.

2. Кудинов, В. М. Сварка взрывом в металлургии [Текст] / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.

3. Бердыченко, А. А. О возможном возгорании выбрасываемых в зазор частиц металла при сварке титана взрывом [Текст] / А. А. Бердыченко, Л. Б. Первухин, А. А. Штерцер, Б. С. Злобин // Физика горения и взрыва. – 2003. – № 2 – с. 128–136.

4. Способ получения крупногабаритных биметаллических листов сваркой взрывом [Текст]: пат. 2174458 Рос. Федерация: МКП 7 В 23 К 20/08, В 32 В 7/04 / Тетюхин Л. В., Первухин Л. Б., Бердыченко А. А. и др.; заявитель и патентообладатель ОАО Верхнесалдинское металлургическое производственное объединение. – 2000101208/02; заявлено 12.01.2000; опубл. 10.10.2001, Бюл. № 28.

Бердыченко А. А., к.т.н., доцент,
e-mail: berd50@mail.ru,

Вольферц Г. А., к.т.н., с.н.с.,
e-mail: svarka-biznes@mail.ru,
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Первухин Л. Б., д.т.н., проф., гл. науч. сотрудник Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, тел. 8(49652)46-376, e-mail: bitrub@mail.ru