

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ БИМЕТАЛЛА, ПОЛУЧЕННОГО АВТОНОМНОЙ ВАКУУМНОЙ НАПАЙКОЙ МЕДИ НА СТАЛЬ

М.Г. АТРОШЕНКО, М.А. ПОЛЕЩУК, А.В. ШЕВЦОВ, А.Л. ПУЗРИН, Д.Д. МИЩЕНКО,
И.П. СЕРЕБРЯНИК, А.И. БОРОДИН

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Определены физико-механические свойства зоны соединения биметалла, полученного автономной вакуумной напайкой меди М1 на стальные заготовки. При испытании на растяжение разрушение стандартных образцов всегда происходило в медной части. При этом прочностные свойства медного напаянного слоя в исходном состоянии превышали справочные значения для деформированной и отожженной меди М1. Предел прочности на отрыв напаянного медного слоя, определенный на специальных образцах, равен временному сопротивлению на разрыв стали 20. Исследования физических характеристик зоны соединения показали, что при технических расчетах дополнительным электрическим и термическим сопротивлениями зоны контакта можно пренебречь. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: автономная вакуумная напайка; биметалл сталь–медь; механические свойства зоны соединения; электро- и теплосоппротивления контакта

При производстве отдельных узлов машин и агрегатов в некоторых случаях используют заранее изготовленные биметаллические медно-стальные заготовки. Применение таких заготовок позволяет получать детали, надежно работающие при высоких электрических, тепловых и механических нагрузках. При их работе важное значение имеют физико-механические свойства металла в зоне соединения меди со сталью. Переходная зона сталь–медь должна обладать минимальными электрическим и тепловым сопротивлениями и иметь достаточно высокую механическую прочность.

Очевидно, что конкретные значения этих величин зависят от способа изготовления медно-стальной заготовки.

Биметаллические полосы толщиной до 4,0 мм, используемые для производства силового электротехнического оборудования, изготавливают, в основном, совместной прокаткой стальных и медных полос или многослойных пакетов [1, 2]. Заготовки других форм с большим поперечным сечением можно производить диффузионной сваркой в вакууме [3], сваркой взрывом [4], сваркой трением с перемешиванием [5], а также высокотемпературной пайкой [6]. Для изготовления крупногабаритных заготовок, таких как водоохлаждаемые подовые электроды дуговых сталеплавильных печей постоянного тока, подшипников скольжения больших диаметров и т. д., применяют различные виды сварки плавлением [7], в том числе электрошлаковую [8], используют заливку расплавленной меди на нагретую до 900 °С сталь [9].

В последнее время разработан способ получения крупногабаритных медно-стальных заготовок путем плавления меди в автономном вакууме. Способ основан на использовании автовакуумного эффекта, который заключается в самопроизвольной очистке от оксидных пленок поверхностей стальных заготовок при их нагреве до температуры более 1000 °С в условиях замкнутого объема. В этом случае кислород, находящийся в составе оксидной пленки, диффундирует вглубь стальной заготовки. Одновременно происходит окисление ее поверхности кислородом из замкнутого объема. Процесс диффузии продолжается до тех пор, пока не израсходуется весь кислород замкнутого объема и не исчезнет оксидная пленка. Время удаления оксидной пленки с поверхности стальной заготовки может быть сокращено путем предварительной откачки воздуха из замкнутого объема [10].

Для изготовления биметаллического изделия на стальной части заготовки, будущей поверхности раздела биметалла, создают замкнутый объем. В него помещают медь в количестве, необходимом для получения медной части заготовки. После герметизации объема с медью сборку нагревают до температуры 1130...1150 °С. При такой температуре происходит очистка стальной поверхности от оксидной пленки, что приводит после расплавления меди к образованию прочной металлургической связи со сталью [11].

Целью настоящей работы является определение физико-механических характеристик переходной зоны сталь–медь, полученной плав-

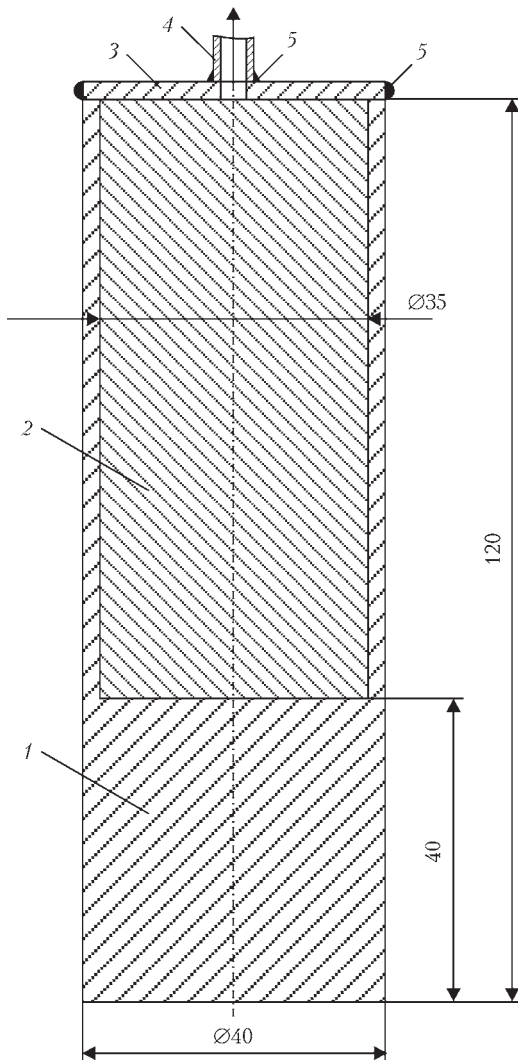


Рис. 1. Эскиз опытной заготовки для пайки: 1 — полый цилиндр; 2 — расплавляемый компонент (медь); 3 — крышка; 4 — патрубок для вакуумирования; 5 — герметизирующие сварные швы

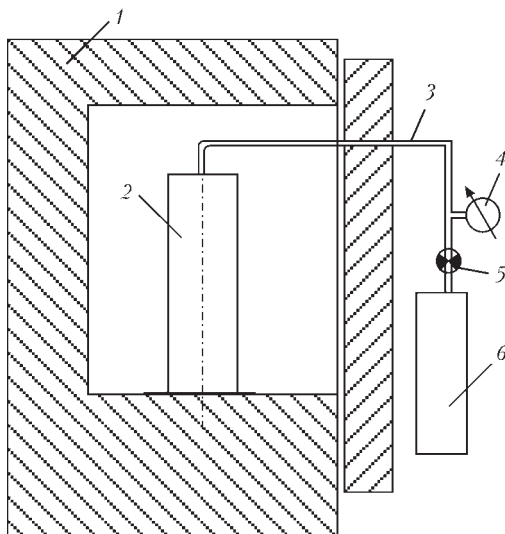


Рис. 2. Схема проведения автономной вакуумной пайки: 1 — термическая печь; 2 — опытная заготовка; 3 — вакуумпровод; 4 — мановакуумметр; 5 — вентиль; 6 — форвакуумный насос

лением меди в автономном вакууме, а именно электрического и теплового сопротивления, механической прочности на растяжение и отрыв.

Для проведения исследований изготавливали полые цилиндры с массивным дном из стали 20. Полости цилиндров плотно заполняли обрезью медного листа М1 толщиной 2,5 мм. Отверстие полости закрывали стальной крышкой, в центр которой вваривали тонкостенную стальную трубку. Крышку герметизировали аргонодуговой сваркой (рис. 1).

Подготовленные к опыту цилиндры размещали в термической печи с обычной атмосферой. Патрубок-вакуумпровод выводили наружу и подключали к форвакуумному насосу через вентиль с мановакуумметром (рис. 2).

Перед нагревом внутри цилиндров форвакуумным насосом создавали разрежение и перекрывали вентиль. Термическую печь нагревали до температуры 1150 °С и после 30 минутной изотермической выдержки отключали и открывали дверцу. Цилиндры до полного охлаждения оставляли внутри печи. Во время нагрева разрежение внутри цилиндров по показаниям мановакуумметра практически не менялось.

После охлаждения каждый цилиндр разрезали вдоль образующей на четыре равные части, из которых изготавливали образцы для механических испытаний, измерения электросопротивления и изучения микроструктуры переходной зоны.

На рис. 3 приведена фотография макрошлифа продольного темплета цилиндрической медно-стальной заготовки. Визуальный осмотр макрошлифа с применением лупы десятикратного увеличения не выявил дефектов, нарушающих сплошность металла в напаянной меди и в зоне соединения ее со сталью.

Для проведения механических испытаний на растяжение изготавливались образцы диаметром

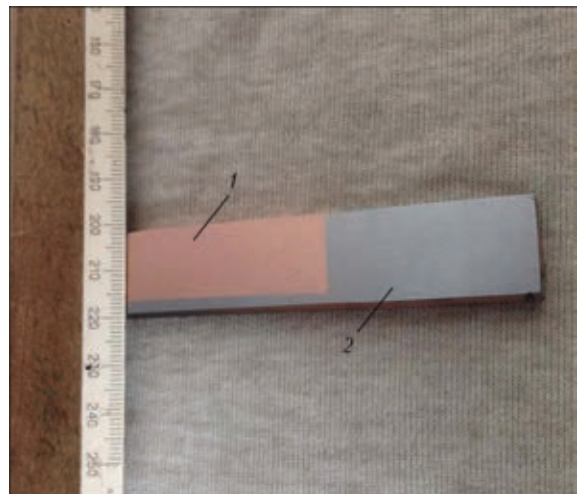


Рис. 3. Макрошлиф сталемедного биметаллического соединения: 1 — медь; 2 — сталь



Рис. 4. Образцы после испытаний на растяжение

разрывной части 6,0 и длиной 40 мм. Сталемедный контакт располагался на середине разрывной части. При испытаниях разрушение всех образцов происходило по медной части (рис. 4). Это означает, что прочность контакта медь–сталь выше, чем прочность меди на растяжение.

Результаты испытаний приведены в таблице.

Приведенные данные свидетельствуют, что значения механических свойств испытанных образцов выше, чем у деформированной и отожженной меди по справочным данным [12].

Основной характеристикой качества биметаллического соединения является прочность на отрыв напаянного слоя. Для получения достоверных данных о прочности на отрыв следует испытывать образцы специального вида, которые имеют кольцевую проточку на более прочном элементе соединения (рис. 5).

Такая проточка уменьшает площадь контакта меди со сталью, одновременно сохраняя неизменным диаметр медной части образца [13]. Испытания показали, что разрушение произошло по линии соединения. При этом среднее значение предела прочности на отрыв составило 480 МПа, что соответствует значению временного сопротивления разрыву у отожженной стали 20 [12].

Таким образом, приведенные выше результаты механических испытаний свидетельствуют о том, что метод автономной вакуумной напайки позво-

Механические свойства сталемедных образцов в сравнении со свойствами меди

№ образца	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное сужение, %
1	110,3	282,5	70,0
2	113,5	281,0	73,1
3	127,4	282,8	73,1
Среднее	117,06	282,7	72,06
Медь, деформированная и отожженная [12]	74,0	216,0	75,0

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

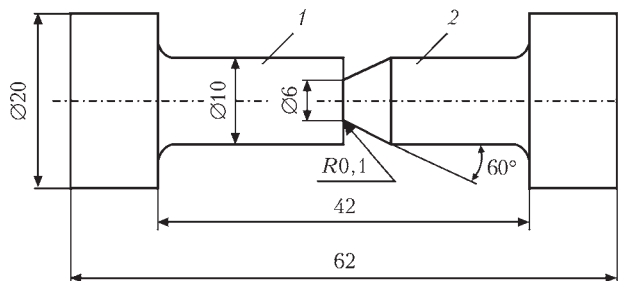


Рис. 5. Эскиз образца для испытаний на статический отрыв: 1 — медная часть; 2 — стальная часть

ляет получить сталемедный биметалл с высокой прочностью соединения слоев.

Другими важными характеристиками, которые обеспечивают надежную работу биметалла при высоких электрических и тепловых нагрузках, являются величины электрического и теплового сопротивления в районе контакта сталь–медь. Чем меньше эти сопротивления, тем лучше теплоотвод через границу раздела и ниже электрические потери при прохождении тока через нее. В переходной области происходит изменение коэффициентов электро- и теплопроводности от значений, присущих стали, до таковых у меди. При отсутствии в ней большого количества пор, трещин и др. дефектов, нарушающих плотность металла, эти изменения происходят плавно. Поэтому в переходной зоне величина этих коэффициентов может быть принята как среднее значение между коэффициентами медной и стальной частей. При таком допущении полное электрическое и тепловое сопротивление переходной зоны определяются только ее шириной. Переходная зона сталь–медь биметаллических соединений, полученных различными способами сварки и плавнения, определяется как область распространения твердых растворов меди в стали и стали в меди по обе стороны границы раздела. Эти твердые растворы менее электро- и теплопроводны чем чистая медь [7]. Таким образом, измеряя электро- или теплопроводность биметаллического образца в направлении, перпендикулярном линии соединения, можно экспериментально определить ширину переходной зоны.

В металлических проводниках существует прямая связь между электро- и теплосоппротивлением, определяемая законом Видемана-Франца в его современной интерпретации. Таким образом, зная одну из этих величин всегда можно определить другую. Методически значительно проще измерять электросопротивление. Поэтому мы провели его оценку, используя методику, предложенную в работе [7].

Из цилиндров изготовили образцы размером 4×4×40 мм таким образом, чтобы граница раздела сталь–медь находилась посередине.

Измерения проводились методом «амперметра-вольтметра» в дифференциальном варианте

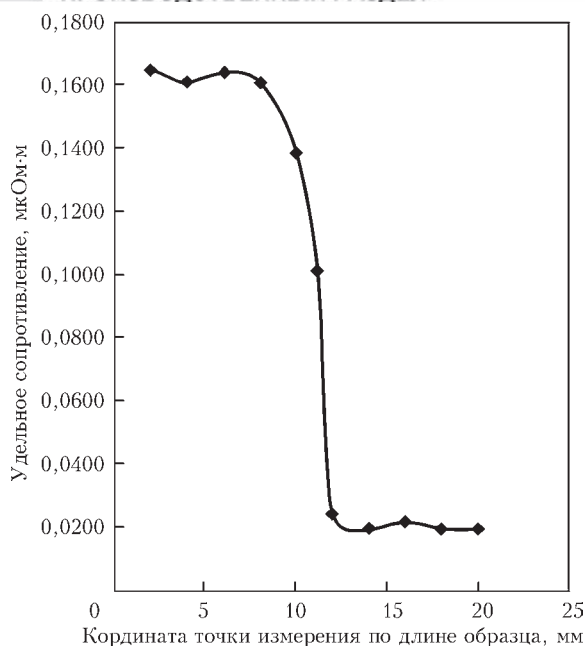


Рис. 6. График изменения электрического сопротивления переходной зоны биметалла сталь-медь, полученного автономной вакуумной напайкой

путем перемещения потенциометрической вилки с распадом электродов 2,3 мм шагом 1 мм от стальной части к медной перпендикулярно линии сплавления. Результаты измерения показаны на рис. 6.

График, приведенный на этом рисунке, показывает, что изменение электросопротивления на границе раздела сталь-медь сосредоточено на отрезке около 4,0 мм. Однако размер этого отрезка не может быть отождествлен с шириной переходной зоны нашего соединения. На самом деле она значительно меньше. Об этом свидетельствует характер кривой изменения электросопротивления в районе границы раздела сталь-медь.

Действительно, судя по графику, первоначальное изменение сопротивления происходит плавно от стали к меди на протяжении более 2,0 мм, а затем резко снижается вплоть до значения, присущего меди. Такой вид кривой свидетельствует о том, что ширина переходной зоны меньше, чем расстояние между электродами потенциометрической вилки. Следовательно, разрешающая способность метода, предложенного в работе [7], не позволяет оценить ширину тонких переходных зон, а только определить среднее значение электросопротивления в ней.

Выявить размеры переходной зоны можно металлографическим методом путем исследования микрошлифов. На рис. 7 представлена микроструктура биметаллического соединения, полученного методом автономной вакуумной напайки меди на стальную поверхность.

В результате взаимодействия расплава меди М1 со сталью 20 при увеличении 100 наблюдает-

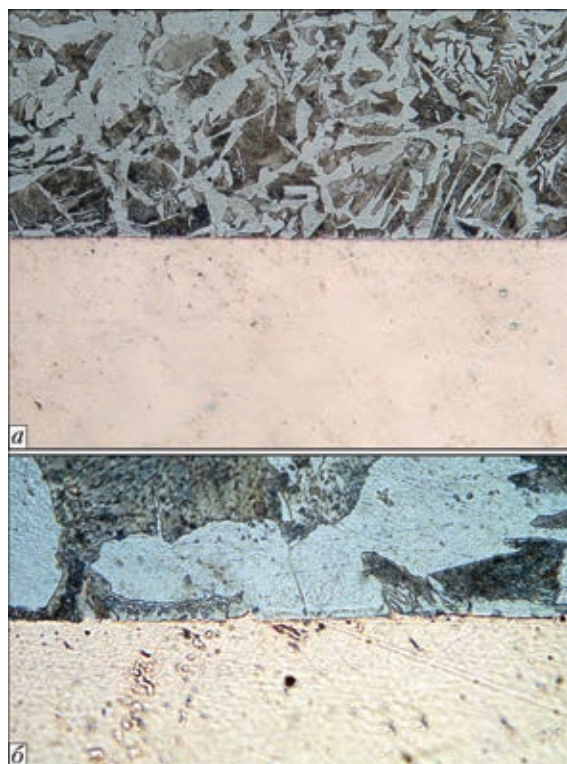


Рис. 7. Микроструктура биметаллического соединения, полученного автономной вакуумной напайкой меди на сталь: а — $\times 100$; б — $\times 1000$

ся линия сплавления повышенной травимости. При увеличении 1000 видна начальная стадия проникновения меди в сталь. Структура стали (феррит + перлит) вблизи линии сплавления существенно не отличается от остального массива. По всему объему напаянной меди имеют место мелкие неметаллические включения, концентрация которых увеличивается у границы раздела на расстоянии 40...50 мкм.

Микротвердость измеряли при нагрузке 50 грамм в направлении, перпендикулярном линии сплавления. Со стороны стали было отмечено резкое увеличение микротвердости. Так, в основном массиве стали микротвердость составляет около 1880 МПа. На расстояния 10...15 мкм от линии сплавления и до нее микротвердость достигает 3000 МПа. Со стороны меди резких изменений микротвердости не наблюдается. По всему сечению напаянной меди она составляет 920...1080 МПа.

Таким образом, при изучении микроструктуры биметаллического соединения по обе стороны границы раздела были выявлены две аномальные области в которых может происходить изменение коэффициентов электро- и теплопроводности. Со стороны стали это область повышенной микротвердости, а со стороны меди — область высокой концентрации неметаллических включений.

Суммарная протяженность этих областей не превышает 70 мкм. Поэтому размер этого участ-

ка можно отождествлять с шириной переходной зоны от стали к меди.

Эта ширина, как минимум, на три порядка меньше ширины каждой составляющей сталемедного биметалла. Следовательно, общие дополнительные электрическое и термическое сопротивления переходной зоны, определяемые как произведение средних значений удельных сопротивлений в ней на ее ширину, будут на те же три порядка меньше сопротивлений каждой части биметаллического контакта. Поэтому при инженерных электрических и тепловых расчетах биметаллического сталемедного соединения, полученного автономной вакуумной напайкой, этими дополнительными сопротивлениями можно пренебречь.

Выводы

1. Контакт между сталью и медью в биметаллических соединениях, полученных автономной вакуумной напайкой меди, при электрических и тепловых расчетах можно считать идеальным.

2. При испытании на растяжение разрушение стандартных биметаллических образцов происходит по меди. При этом прочностные свойства медного напаянного слоя превышают справочные значения для деформированной и отожженной меди М1.

3. Предел прочности на отрыв напаянного медного слоя, определенный на специальных образцах, соответствует временному сопротивлению на разрыв стали 20.

4. Технология автономной вакуумной напайки может быть использована для получения биме-

талла, состоящего из углеродистых сталей и меди других марок.

1. Пат. 52-123824 Япония, МКИ 12А 220 С 23 с 1/00. Одностороннее плакирование стального листа / М. Кунихару и др.; Заяв. 15.10.77; Опубл. 8.05.79, № 54-56940.
2. Буков А.А. Коррозионностойкий биметаллический листовый прокат // Сталь. – 1979. – № 6. – С. 446–450.
3. Николаев Г.А., Ольшанский И.А. Специальные методы сварки. – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с.
4. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. Сварка взрывом в металлургии / Под ред. Э.С. Каракозова. – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.
5. Технология восстановительного ремонта слябовых кристаллизаторов МНЛЗ наплавкой трением с перемешиванием / Ю.А. Никитюк, Г.М. Григоренко, В.И. Зеленин и др. // Современ. электрометаллургия. – 2013. – № 3. – С. 51–55.
6. Патон Б.Е., Россошинский А.А. Некоторые вопросы развития технологии пайки // Современные методы пайки. – Киев, 1982. – С. 3–12.
7. Сварное соединение меди со сталью в подовом электроде дуговой сталеплавильной печи постоянного тока / В.И. Лакомский, А.Г. Богаченко, Д.Д. Мищенко и др. // Современ. электрометаллургия. – 2013. – № 4. – С. 7–9.
8. Электрошлаковая технология в производстве биметаллических заготовок / Б.Е. Патон, В.Я. Саенко, Л.Б. Медовар и др. // Там же. – 2004. – № 2. – С. 8–11.
9. Голованенко С.А., Меандров Л.В. Производство биметаллов. – М.: Металлургия, 1966. – 256 с.
10. Пузрин Л.Г., Бойко Г.А., Атрошенко М.Г. Автовакуумная высокотемпературная пайка. – Киев: Об-во «Знание» УССР, 1975. – 18 с.
11. А.с. № 1235075 СССР. Способ изготовления охлаждаемых панелей / И.П. Серебряник, Ю.М. Буравлев, Н.П. Иваницын и др.; Заяв. 28.06.1984.
12. Келогду Ю.П., Захариевич К.М., Карташевская М.А. Металлы и сплавы: Справочник. – Кишинев, 1977. – 264 с.
13. Метод определения сопротивления отрыву плакирующего слоя биметаллов / В.Г. Овсянников, В.И. Шейко, В.А. Малышев, Л.Г. Илюхина // Зав. лаборатория. – 1976. – № 3. – С. 339–340.

Поступила в редакцию 30.07.2015



Ассоциация «Электрод»

ООО Промышленная компания «ХОБЭКС электрод»



IX Международная конференция «Дуговая сварка. Материалы и качество»

Посвящается 50-летию Первой всесоюзной конференции по сварочным материалам (1966 г.)
и 25-летию создания ассоциации «Электрод» (1990 г.).

31 мая – 3 июня 2016 г.

г. Волгоград

Тематика конференции

- Совершенствование дуговых процессов сварки
- Разработка инновационных сварочных материалов
- Технологии производства материалов и подготовка кадров
- Качество и конкурентоспособность материалов

<http://association-electrode.com>; тел./факс: (+38044) 200 63 02. E-mail: office@association-electrode.com

Информационная поддержка: журнал «Автоматическая сварка».