

КОНТАКТНАЯ СВАРКА ГИБКИХ СЕРЕБРЯНО-МЕДНЫХ ТОКОПОДВОДЯЩИХ ШИН

В. С. КУЧУК-ЯЦЕНКО, канд. техн. наук, **А. Г. САХАЦКИЙ**, **А. А. НАКОНЕЧНЫЙ**, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Разработана технология контактной сварки на воздухе и в защитном газе гибких медных шин с приваренными на контактных площадках серебряными пластинами применительно к изготовлению гибких связей для высоковольтных вакуумных переключателей. Установлено, что при определенном термомеханическом цикле возможно получение качественного сварного соединения пакета медно-серебряной фольги. Изучен механизм деформации пакета и формирования сварного соединения. Изготовлены экспериментальная установка и блок управления процессом сварки.

Ключевые слова: контактная сварка, автовакуумная сварка, пакет фольги, серебро, медь, высоковольтный вакуумный переключатель

Разработка технологии контактной сварки биметаллической гибкой токоподводящей шины вызвана необходимостью применения в промышленности технологичного, обеспечивающего высокое качество процесса производства медных и серебряно-медных гибких связей, в частности для высоковольтных вакуумных переключателей. Основными требованиями, предъявляемыми к гибким шинам, являются обеспечение надежного контакта, стабильно низкое переходное сопротивление в процессе работы и высокая усталостная прочность при циклической знакопеременной нагрузке [1].

В настоящее время применяют различные способы присоединения концов медных гибких шин: механический прижим пакета к токоподводу; низкотемпературная пайка оловянно-свинцовыми припоями и высокотемпературная пайка припоями систем серебро-медь и медь-фосфор, приваривание к пакету медных накладок способом электродуговой или газовой сварки, контактную автовакуумную сварку, сварку взрывом, диффузионную сварку в вакууме [2].

Механический прижим осуществляют, как правило, болтовыми соединениями, которые в процессе работы ослабляются, особенно на установках, испытывающих вибрационные нагрузки, что приводит к нарушению контакта. Пайку концов гибкой шины обычно выполняют путем погружения в сварочную ванну расплавленного припоя или индукционного нагрева пакета с промежуточными вставками фольги припоя. Соединенные таким образом пакеты вследствие растекания припоя на границе спаиваются, теряют гибкость, что в процессе эксплуатации приводит к отрыву фольги от контактной площадки. При пайке не удается обеспечить стабильно низкое переходное сопротивление и геометрию монолитной части. Кроме того, внутри пакета скапливаются остатки от флюсования, что приводит к окислению и коррозии гибких связей, недопус-

тимых при эксплуатации гибкой шины в вакууме [3, 4].

При приварке к пакету медных накладок дуговым или газовым способом происходит прожог фольги и не удается обеспечить равномерное соединение по всему сечению пакета.

Сварка взрывом сопряжена с повышенной трудоемкостью и себестоимостью, возникают трудности при сварке пакета из тонкой фольги из-за выгорания верхних слоев.

Высокое качество соединения и стабильность эксплуатационных показателей удается достигнуть благодаря применению диффузионной сварки в вакууме [5]. При этом способе сварки возможен режим, обеспечивающий свариваемость серебряно-медного пакета, при котором температура сварки составляет 750 °С, усилие сжатия — 3 МПа, а минимальное время сварки — примерно 15 мин [5]. Однако длительный отжиг при высокой температуре приводит к росту зерна в переходной зоне гибкая часть-монолит, что снижает усталостную прочность гибкой шины [6]. Кроме того, сварка в вакууме связана с высокой стоимостью оборудования и большими эксплуатационными затратами, а также с низкой производительностью процесса.

Наиболее технологичным является способ контактной сварки многослойных пакетов медной фольги благодаря эффекту автовакуумирования и совместной пластической деформации [7]. Процесс предполагает сварку гибких шин различной номенклатуры, отличается простотой и доступностью оборудования, вероятностью высокой автоматизации процесса. Главными недостатками контактной сварки являются перегрев слоев, примыкающих к монолитной части, и снижение показателей усталостной прочности.

Основной проблемой при контактной сварке пакета серебряной и медной фольги является контактное плавление меди и серебра с образованием эвтектики 72 % Ag и 28 % Cu при 780 °С. Однако, как установлено экспериментально, сварка медной фольги возможна при температуре, превышающей 830 °С. Следовательно, при контактной сварке медного пакета на существующих режимах происходит

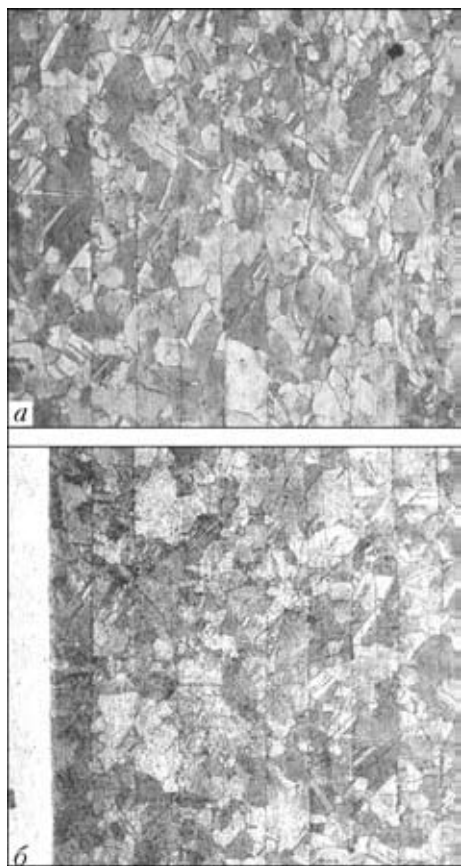


Рис. 1. Микроструктура зоны монолита медь–медь (а) и медь–серебро (б), $\times 250$

расплавление серебряных пластин и выход на поверхность пакета жидкой фазы.

Целью настоящей работы являлось изучение особенностей контактной сварки пакета серебряной и медной фольги, исследование процессов взаимодействия серебро–медь и медь–медь при различных режимах сварки.

Отработку режимов и исследование особенностей формирования сварного соединения выполняли на образцах размером $90 \times 40 \times 10$ мм, представляющих собой пакет медной фольги марки М1 толщиной 50 мкм с привариваемыми в местах замоничивания серебряными накладками $20,0 \times 40,0 \times 0,3$ мм. Следовательно, площадь замониченных участков составляет 1600 мм^2 . Такой образец является заготовкой гибкого шинпровода, используемого в высоковольтных вакуумных переключателях.

Для проведения экспериментов модернизировали установку для контактной сварки К602 с учетом следующих технологических особенностей: во избежание шунтирования тока сваривали оба конца гибкой связи одновременно, для одинакового тепловыделения в каждом замоничиваемом участке обеспечивали равномерное приложение давления на каждую пару электродов и равномерное распределение плотности тока как между парами электродов, так и по площадке сваривания. Опытные сварки проводили на воздухе и в защитных газах.

При сжатии на воздухе в микрообъемах, формируемых стыкуемыми поверхностями, остается

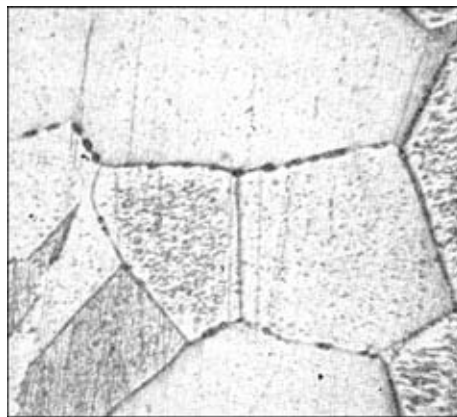


Рис. 2. Микроструктура микропор на границе зерен в меди после сварки, $\times 400$

воздух, который не удаляется из стыка даже в вакууме и влияет на процесс сварки контактирующих поверхностей в твердой фазе. В ходе нагрева в этих микрообъемах происходят процессы самоочистки поверхности от оксидных плен и образование вакуума [7]. При нагреве и пластической деформации давление газовой среды должно достигать значений, соизмеримых с пределом текучести меди при температуре сварки.

Поверхность меди представляет собой зерна, покрытые слоем оксидов меди Cu_2O и CuO с адсорбированными поверхностью газами и влагой [8]. При нагреве контактирующих поверхностей происходит самогерметизация замкнутых микрообъемов слоем оксидов. Кислород в них полностью выгорает с образованием оксида меди Cu_2O , который, образуя с медью эвтектику по межзеренным границам, проникает внутрь металла [9]. Азот, не растворяющийся в меди, удаляется из микрополостей в процессе высокотемпературной пластической деформации.

Установлено, что пластическая деформация в меди при высоких температурах проходит по механизму диффузионной ползучести. При этом по границам зерен происходит интенсивное образование микропор, захватывающих атомы азота. Микропоры располагаются вдоль поперечных границ хаотически. Методами оптической металлографии не удается установить зоны образования микропор. Существует определенная зависимость образования микропор от взаимной ориентировки зерен: они никогда не возникают на двойниковых границах [10].

Как следует из работы [10], для меди характерна неустановившаяся стадия диффузионной ползучести, при которой скорость деформации на порядок выше, чем в случае установившейся стадии диффузионной ползучести. В исследованиях, выполненных авторами работы, определено, что неустановившаяся стадия ползучести при предплавленных температурах обусловлена неравновесным состоянием образцов. Отжиг образцов перед испытаниями приводил к исчезновению неустановившейся стадии ползучести.

Следовательно, необходимым условием получения качественного сварного соединения пакета медной фольги является активация диффузионной

ползучести меди, в частности ее первичной неустановившейся стадии, при которой происходит активный массоперенос в околосшовной зоне. Энергия, необходимая для активации процесса, на порядок меньше для материала, деформированного выше критической степени деформации [11, 12]. Это согласуется с проведенными экспериментами, при которых для холоднокатаной фольги активация процесса ползучести происходит при 800...810 °С, тогда как для фольги после отжига при 900 °С.

Разработан такой термометформационный цикл контактной сварки серебряно-медного пакета фольги, при котором обеспечивается качественное сваривание как медного пакета, так и серебряных накладок. Основную сложность представляла разработка циклограммы сварочного тока, обеспечивающего нагрев в зоне сварки выше точки эвтектического плавления, но не дольше временной задержки образования эвтектики медь-серебро.

Проведенная серия экспериментов показала высокую стабильность результатов, отсутствие непроваров и подплавления серебряных накладок. По сравнению с ранее известными режимами сварки медных пакетов, время сварки сократилось от 2 мин до 14 с, что позволило избежать перегрева слоев, примыкающих к монолитной части. Таким образом, можно рекомендовать разработанный термометформационный цикл при сварке не только серебряно-медных гибких шин, но и чисто медных токопроводящих.

Для определения качества сварного соединения медные гибкие связи подвергали металлографическому исследованию и механическим испытаниям.

С помощью оптического микроскопа МИМ-7 на микрошлифах исследовали формирование сварных соединений серебро-медь и медь-медь. Для пары медь-серебро на границе соединения образуется слой раствора меди в серебре толщиной около 20 мкм. Толщина диффузионной зоны проникновения серебра составляет в среднем 150 мкм, что свидетельствует об активном массопереносе при сварке. Промер микротвердости в зоне сварки показал, что образования хрупких фаз не происходит. Результаты исследований соединения на границе медных листов показали наличие общих зерен, что свидетельствует о произошедшей в процессе сварки рекристаллизации. По границам зерен обнаружены микропоры, что свидетельствует о произошедшей пластической деформации по механизму диффузионной ползучести.

Прочностные свойства сварных соединений определяли натурными испытаниями на макете высоковольтного переключателя. Образцы выдержали 250 тыс. циклов без изменения геометрии, ме-

ханических и электрических свойств. По нормам эксплуатации гибкая связь высоковольтного переключателя должна выдерживать 100 тыс. циклов. Гибкие связи подвергали еще одному методу контроля — замерам сопротивления электрического тока, которые показали, что сопротивление сварных гибких связей составляет примерно 15 мкОм, что почти в 2,0...2,5 раза меньше сопротивления паяных гибких связей.

Выводы

1. Установлено, что для качественной автовакуумной контактной сварки медного пакета необходимо инициировать процесс диффузионной ползучести, энергия активации которого зависит от степени нагартованности медной фольги.

2. Использование холоднокатаной медной фольги в сочетании с дозированным энерговыделением позволяет значительно повысить качество соединений такого типа, особенно показатели усталостной прочности, получить соединения с высокой электропроводностью. Одновременно решена проблема нанесения серебряных покрытий на медные пакеты.

1. Чмырев И. А., Яворский Ю. Д. Контактная сварка пакетов медной фольги // Автомат. сварка. — 1968. — № 6. — С. 55–57.
2. Мастеров В. А., Саксонов Ю. В. Серебро, сплавы и биметаллы на его основе: Справочник. — М.: Металлургия, 1979. — 296 с.
3. Михайлова Э. М. Контактная сварка в вакууме медных гибких связей // Свароч. пр-во. — 1972. — № 10. — С. 42–43.
4. Квасницкий В. Ф. Исследование процесса и разработка технологии соединения меди без расплавления // Технология судостроения и сварочного производства в судостроении. — Николаев, 1973. — С. 83–88.
5. Козаков Н. Ф., Бойченко А. Н. Исследования процесса диффузионной сварки в вакууме некоторых драгоценных металлов и сплавов с недрагоценными // Диффузионные соединения в вакууме. — М.: МТИМП, 1971. — С. 98–108.
6. Абрамов В. В., Ахунданова Л. А. Пластичность и микротвердость приконтактных слоев меди при сварке давлением с подогревом // Свароч. пр-во. — 1986. — № 11. — С. 23–24.
7. Самоочистка от оксидов стыкуемых поверхностей при сварке в твердой фазе с нагревом / С. И. Кучук-Яценко, Г. К. Харченко, Ю. В. Фальченко, С. Г. Григоренко // Автомат. сварка. — 1998. — № 2. — С. 16–24.
8. Суцков Д. И. Медь и ее сплавы. — М.: Металлургия, 1967. — 248 с.
9. Гегузин Я. Е. Физика спекания. — М.: Наука, 1967. — 360 с.
10. Розенберг В. М. Ползучесть металлов. — М.: Металлургия, 1967. — 275 с.
11. Малевский Ю. Б., Маркашова Л. И. Образование активных зон при сварке без расплавления // Автомат. сварка. — 1968. — №. — С. 71.
12. Малевский Ю. Б., Маркашова Л. И., Несмих В. С. Роль рекристаллизации в образовании соединения при сварке в твердом состоянии // Диффузионные соединения в вакууме. — М.: МТИМП, 1971. — С. 87–98.

The technology of resistance welding in air and shielding gas atmosphere has been developed for joining flexible copper busbars with silver plates welded to the contact pads to manufacture flexible connections for high-voltage vacuum switches. It has been established that the use of a certain thermal-deformation cycle can provide a sound welded joint on the copper-silver foil stack. The mechanism of deformation of the stack and formation of a welded joint have been studied. The experimental welding machine and control unit have been manufactured.

Поступила в редакцию 25.07.2003