

# Шинопроводы алюминий–медь.

## Новые возможности

**Петр Васильев**  
**Михаил Шведов**  
**Олег Христофоров**  
**Владимир Григорьев**

svarkacheb@yandex.ru

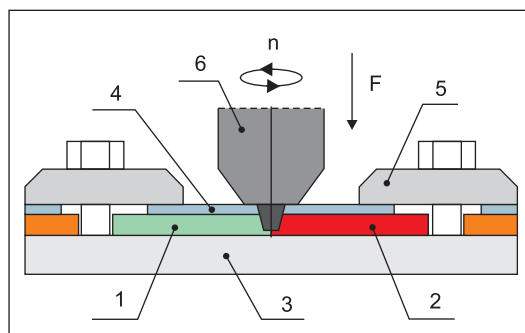
Современные изделия преобразовательной техники предназначены для управления устройствами значительной мощности, вплоть до нескольких мегаватт. Соответственно величины коммутируемых токов составляют тысячи ампер. Данное обстоятельство предъявляет особые требования к исполнению проводниковых элементов как в части проводимости, так и по механическим свойствам по причине значительных динамических нагрузок, имеющих место при коммутации токов. По этой причине в конструкциях силовоточных электротехнических устройств электрические цепи выполняются, как правило, медными и алюминиевыми шинами. При этом также используются составные алюминий-медные шинопроводы. Неразъемные соединения алюминий-медь в них могут выполняться контактной сваркой либо холодной сваркой под давлением [1]. Технические требования к последним устанавливаются по ГОСТ 19357 «Пластины переходные медно-алюминиевые». Указанный ГОСТ регламентирует материал пластин — алюминий АД0 и медь ШММ либо М1, типоразмеры, внешний вид и механические свойства сварного соединения. Требования к электрическому сопротивлению сварного шва при этом не устанавливаются.

В настоящее время все большее распространение при изготовлении сборочных узлов различных изделий получает технология сварки трением с перемешиванием [2]. Значительный экономический эффект она обеспечивает при изготовлении крупногабаритных изделий из алюминиевых сплавов [3]. Представляет интерес внедрение данного способа сварки в производстве изделий электротехники, для которой дуговая

электрическая сварка является нетипичным технологическим процессом и влияет на себестоимость конечного продукта [4, 5]. Одним из существенных преимуществ данного способа сварки является возможность получения биметаллического соединения из материалов, не реализуемых обычной дуговой сваркой [6, 7]. Применительно к электротехнике это означает возможность изготовления сварного биметаллического соединения алюминиевых и медных шин [8].

Сварка стыкового шва, соединяющего разнородные материалы, отличается от сварки однородных материалов по причине различия механических свойств исходных материалов. Предел прочности мягких шин из меди марки М1 должен составлять 220–240 МПа, в зависимости от толщины шины. Предел прочности алюминиевой шины марки АД0, в зависимости от состояния поставки, находится в диапазоне 60–130 МПа, шины марки АД31 — 100–250 МПа. Разница температур плавления алюминия (+660 °С) и меди (+1083 °С) затрудняет равномерное перемешивание металла соединяемых кромок в процессе сварки.

Учитывая приведенные обстоятельства, нами был опробован способ сварки стыкового шва по накладной технологической пластине. Условная схема процесса показана на рис. 1. На стальную подложку (3) устанавливаются алюминиевая (1) и медная (2) пластины. Поверх стыка устанавливается технологическая пластина (4) и прижимается к соединяемым пластинам и подложке прижимами (5). Вращающийся инструмент (6) внедряется в стык соединяемых деталей. Параметры сварки (усилие на инструменте  $F$ , частота вращения  $n$ , скорость подачи стола  $V$ ) подбирались опытным путем соответственно геометрии рабочей части инструмента. Сварку проводили на опытной лабораторной установке, изготовленной ЗАО «Чебоксарское предприятие «Сеспель». Данная схема сварки обеспечивает контакт плоской части инструмента с однородным материалом, что позволяет организовать равномерный поток пластифицированного металла с верхней части пластины в область стыка.

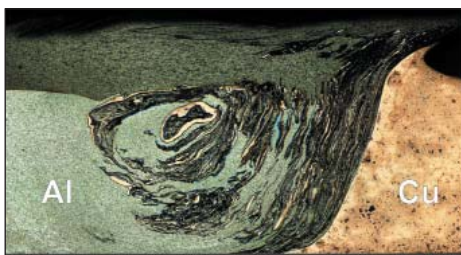


**Рис. 1.** Условная схема процесса сварки трением с перемешиванием биметаллического соединения:  
1 — алюминиевая пластина, 2 — медная пластина,  
3 — металлическая подложка, 4 — накладная технологическая пластина, 5 — прижимы,  
6 — инструмент



**Рис. 2.** Образец сварного шва соединения АД0-М1

На рис. 2 приведено фото полученного таким образом образца сварного шва соединения АД0-М1 с толщиной заготовок 3 мм. Технологическая пластина толщиной 1,5 мм изготовлена из сплава АМг5, предел прочности которого не менее 280 МПа, т. е. превышает аналогичные величины для свариваемых металлов. На рис. 3 приведена макроструктура шлифа поперечного сечения сварного шва. Мы наблюдаем круговое движение материала, характерное для данного способа сварки. В данном случае происходит течение более прочного материала АМг5 с вкраплениями частиц меди. Граница соприкосновения алюминия и меди представляет собой непрерывную кривую без видимых пустот.

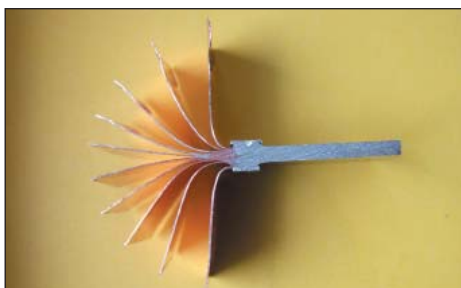


**Рис. 3.** Макроструктура поперечного сечения образца сварного шва АД0-М1

Для оценки механических характеристик были изготовлены два модельных образца сварного шва АМг5-М1 толщиной 3 мм и накладной пластиной из сплава АМг5 толщиной 1,5 мм. При проведении испытаний на статическое растяжение измеренные величины предела прочности составили 151 и 155 МПа, что соответствует требованиям ГОСТ 10434 «Соединения контактные электрические». Поверхность разрыва совпадает с границей раздела алюминий-медь. Соответствующее фото представлено на рис. 4.

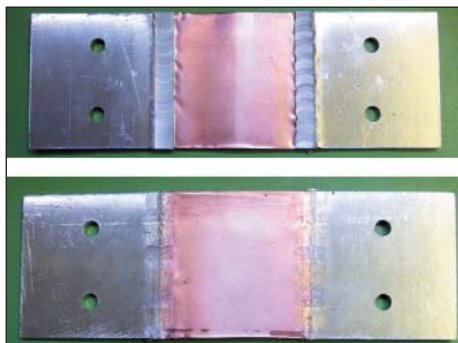


**Рис. 4.** Результат испытания на статическое растяжение образца сварного шва АМг5-М1



**Рис. 5.** Образец биметалла, полученного двусторонней сваркой пакета медной фольги толщиной 0,3 мм и алюминиевой пластины толщиной 3 мм

Практический интерес представляет возможность получения сварных соединений пакета медной фольги с шиной. На рис. 5 показано фото образца, полученного двусторонней сваркой пакета из десяти слоев медной фольги толщиной 0,3 мм и алюминиевой пластины из сплава АМг5 толщиной 3 мм. На рис. 6 представлено фото лицевой и обратной стороны модельного образца компенсатора аналогичного строения, полученного односторонней сваркой.



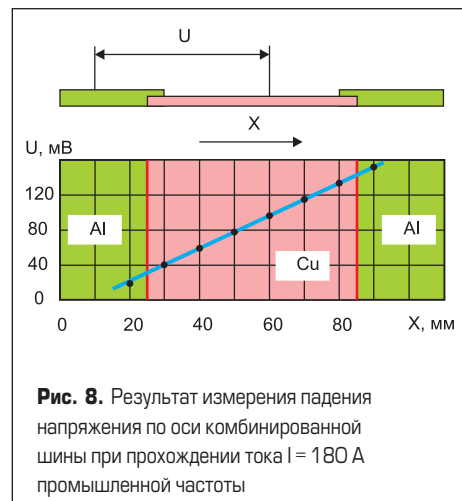
**Рис. 6.** Образец биметалла, полученного односторонней сваркой пакета медной фольги толщиной 0,3 мм и алюминиевых пластин толщиной 3 мм

При изготовлении комбинированных алюминий-медных шинопроводов важно обеспечить постоянство удельного линейного сопротивления в пределах всего шинопровода. Очевидно, что реализовать это требование можно сваркой алюминиевых и медных шин различной толщины. С этой целью были изготовлены модельные образцы из пластин сплава АА 6060 толщиной 5 мм и меди М1 толщиной 3 мм. В алюминиевых пластинах фрезеровалась выборка глубиной 3 мм, куда укладывалась медная пластина. Сварка выполнялась внахлест по алюминию. На рис. 7 показано фото полученного образца непосредственно после сварки и с удалением обработанного материала.

Для оценки качества сварного соединения были проведены измерения проводимости данных образцов. На рис. 8 представлены



**Рис. 7.** Образец комбинированной шины, полученный сваркой пластины М1 толщиной 3 мм и пластин сплава АА 6060 толщиной 5 мм.



**Рис. 8.** Результат измерения падения напряжения по оси комбинированной шины при прохождении тока  $I = 180$  А промышленной частоты

результаты измерения падения напряжения вдоль оси образца при пропускании тока промышленной частоты  $I = 180$  А. Как видно из рассмотрения рисунка, аномального повышения электрического сопротивления в области сварного шва не наблюдается.

Полученные результаты показывают широкие возможности технологии сварки трением с перемешиванием при изготовлении различных моно- и биметаллических элементов шинопроводов, что позволяет находить новые технические решения конструктивных элементов с иными техническими характеристиками и меньшей трудоемкостью изготовления.

### Литература

1. Стройман И. М. Холодная сварка металлов. Л.: Машиностроение, 1985.
2. Третьяк Н. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. 2002. № 7.
3. Бакшаев В. А., Васильев П. А. Сварка трением с перемешиванием в производстве крупногабаритных изделий из алюминиевых сплавов // Цветные металлы. 2014. № 1.
4. Людмирский Ю. Г., Котлышев Р. Р., Огрызко С. И., Райков Р. В. Сварка трением с перемешиванием токоведущих шин электровозов // Сварка и диагностика. 2013. № 3.
5. Васильев П. А., Малов И. А., Смирнов В. М., Христофоров О. В. Новые технологии в производстве изделий силовой электроники // Силовая электроника. 2014. № 5.
6. Murr L. E. A Review of FSW Research on Dissimilar Metal and Alloy Systems // Journal of Materials Engineering and Performance. Vol. 19(8). Nov. 2010.
7. Mubiayi M. P., Akinlabi E. T. Friction Stir Welding of Dissimilar Materials between Aluminum Alloys and Copper – An Overview. Proc. WCE 2013. Vol. III. London. 2013. 3–5 July.
8. Васильев П. А., Шведов М. А., Гусева О. Б., Григорьев В. С. Сварка трением с перемешиванием. Алюминий и медь // Сварщик в России. 2016. № 5.