

УДК 621.791.1

**Калинин Ю. А., Брыков М. Н.**

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТОКОПРОВОДОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

Сварка шин токопроводов является ответственным этапом изготовления трансформаторов. В качестве материала шин используют алюминий технический АД1 (ГОСТ 17232-99) в связи с его лёгкостью, достаточно высокой электропроводностью и относительно низкой стоимостью. Как правило, применяют ручную аргодуговую сварку вольфрамовым электродом в среде защитных газов (TIG). Данный вид сварки во многом зависит от квалификации сварщика

Дефекты, образующиеся в зоне сварки, и человеческий фактор не позволяют получать сварные швы стабильного качества. Поэтому совершенствование технологии изготовления алюминиевых шин токопроводов является в настоящее время актуальной задачей для ПАО «ЗТР», решение которой может привести к существенному уменьшению затрат при производстве трансформаторов.

В последнее время получает распространение новый способ сварки – сварка трением с перемешиванием [1]. Суть способа относительно проста: наконечник сварочного инструмента, вращаясь, проникает в стык и перемешивает материал свариваемых листов в единый монолит (сварной шов). Прижим и основание инструмента обеспечивают нагрев и размягчение металла в зоне шва. Сварные швы, полученные таким способом, обладают рядом преимуществ по сравнению со сваркой TIG: отсутствие пористости и горячих трещин, низкий уровень сварочных деформаций, а также снижение затрат на производство, т. к. не требуются присадочные материалы, защитные газы, зачистка поверхности от брызг, отсутствие необходимости вентиляции зоны сварки, улучшается экологичность процесса. Процесс позволяет получать стабильно высокое качество швов. Этот метод может быть использован для получения стыковых, угловых, нахлесточных соединений.

Единственным недостатком данного метода является наличие углубления в конце сварного шва, но данную проблему легко решают выводные пластины [2]. С другой стороны сварной шов с плоской верхней поверхностью заподлицо со сваренными деталями имеет суммарный вес на 12 % ниже традиционного сварного шва, выполненного методом дуговой сварки [3].

Цель данной работы – получение бездефектного сварного соединения шин токопровода из сплава АД1 по способу сварки трением с перемешиванием.

Листы сплава АД1 (состав, % мас.: Al – 99,8; S – 0,08; Zn – 0,02; Fe – 0,15) толщиной 17 мм соединяли сваркой трением с перемешиванием. Сварка двухсторонняя, без разделки кромок. Материал применяемого инструмента – сталь Р6М5.

Основные параметры данного процесса сварки – скорость вращения инструмента, скорость его перемещения, угол наклона инструмента относительно сварного образца и геометрические параметры самого инструмента [4].

Зависимость качества сварного шва от скорости вращения инструмента и скорости его подачи представлена в табл. 1. При вращении инструмента со скоростью 1200 об/мин, из-за недостаточного тепловложения в сварной шов, формирование шва не наблюдалось. Постепенное увеличение скорости вращения инструмента позволило получить сформировавшийся сварной шов. При уменьшении скорости движения инструмента вдоль сварного шва – улучшилось его качество.

Таблица 1

Зависимость качества сварного шва от скорости сварки и количества оборотов инструмента

| № п/п | $\dot{v}$ , об/мин | $n$ , мм/мин | Вид шва                    |
|-------|--------------------|--------------|----------------------------|
| 1     | 1200               | 50           | Не сформирован             |
| 2     | 1500               | 40           | Неравномерное формирование |
| 3     | 2000               | 40           | Равномерная структура      |

Также изучено влияние угла наклона на качество сварного шва. При небольшом наклоне инструмента шов имел не сформировавшийся вид с видимыми разрывами. Результаты представлены в табл. 2

Таблица 2

Зависимость качества сварного шва от угла наклона инструмента

| Угол наклона, ° | Вид шва                    |
|-----------------|----------------------------|
| 3               | Не сформировался           |
| 4               | Частично сформировался     |
| 5               | Сформировался без дефектов |

После проведения сварки данные образцы были испытаны на разрушение и изгиб в заводской лаборатории согласно ГОСТ 6996-66. Результаты испытаний представлены в табл. 3 и табл. 4.

Таблица 3

Значения предела прочности образцов до разрушения

| Сечение, мм | Разрушающее усилие, кГс | Предел прочности, МПа | Место разрушения |
|-------------|-------------------------|-----------------------|------------------|
| 24,4 × 16,9 | 36000                   | 85,6                  | По шву           |
| 24,7 × 16,9 | 36000                   | 84,6                  | По шву           |
| 24,9 × 16,9 | 36600                   | 85,3                  | По шву           |

Таблица 4

Результаты испытания образцов на изгиб

| Размер, мм        | Угол загиба, град | Дефект      |
|-------------------|-------------------|-------------|
| 16,9 × 20,4 × 200 | 180               | Без дефекта |
| 16,9 × 19,5 × 200 | 180               | Без дефекта |
| 16,9 × 20,0 × 200 | 180               | Без дефекта |

Таким образом, оптимальные параметры режима сварки, полученные в результате проведенных экспериментов, следующие: скорость вращения инструмента – 2000 об/мин, скорость подачи инструмента вдоль шва – 40 мм/мин, угол наклона инструмента 5°.

При анализе существующих патентов в данной отрасли большая часть из них относится к описанию формы инструмента. Точных закономерностей не выявлено, в каждом отдельном случае форма инструмента может быть индивидуальная. В данной работе применялся инструмент, показанный на рис. 1, не имеющий сложной конфигурации.

Результаты данной работы показали, что шины токопровода из сплава АД1 возможно соединять сваркой трением с перемешиванием без образования дефектов, присущих традиционной сварке плавлением. При этом прочность сварного шва соответствует прочности основных листов при сохранении высокой пластичности (рис. 2).



Рис. 1. Внешний вид инструмента из стали P6M5



Рис. 2. Внешний вид образца, вырезанного из сваренных листов сплава АД1, после испытания на изгиб

Зона термического влияния при данном способе сварки аналогична обыкновенным швам, хотя максимальная температура сварки ниже, чем при сварке TIG, что может привести к несколько иным формам микроструктуры шва. Также размеры зоны термического влияния при данном виде сварки меньше, чем при сварке TIG.

Сварка трением с перемешиванием оказывает влияние на твердость сварного материала. Зависимость твердости от расстояния до центра сварного шва показана в табл. 5. Твердость основного материала составила около 28 НВ. Твердость в зоне термического влияния – около 30 НВ, а сварного шва – 32 НВ. Незначительное увеличение твердости в зоне сварного шва по сравнению с основным материалом, вероятно, связано с уменьшением размера зерна и появлением эффекта субструктурного упрочнения алюминия в процессе интенсивной пластической деформации.

Таблица 5

Зависимость твердости от расстояния до центра шва

| Твердость основного металла, НВ | Твердость ЗТВ, НВ | Твердость шва, НВ |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| 28,3                            | 29,5              | 32,1              |
| 28,6                            | 29,7              | 31,9              |
| 28,5                            | 30,1              | 32,4              |

## ВЫВОДЫ

Металл шва по результатам эксперимента обладает большей прочностью по сравнению с основным металлом. Способом сварки трением с перемешиванием возможно получить стабильный бездефектный сварной шов шин токопроводов. Данный вид сварки может быть рекомендован для внедрения в производство после проведения испытаний на электрическую проводимость и исследования микроструктуры шва.

Работа выполнена на оборудовании ПАО «ЗТР»

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муравьев В. И. К вопросу актуальности исследования сварки трением с перемешиванием конструкций из высокопрочных алюминиевых сплавов / В. И. Муравьев, П. В. Бахманов, К. А. Мелкоступов // Учёные записки. – 2010. – № 11. – № 1(2). – С. 110–125.
2. Третьяк Н. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (обзор) / Н. Г. Третьяк // Автоматическая сварка. – 2002. – № 7. – С. 12–21.
3. Сергеева Е. В. Сварка трением с перемешиванием в мировом кораблестроении. Современный уровень развития, перспективы, оборудование [Электронный ресурс] / Е. В. Сергеева // Российский судостроительный портал. – Режим доступа : [http://shipbuilding.ru/rus/research\\_paper/Sergeev\\_Elena](http://shipbuilding.ru/rus/research_paper/Sergeev_Elena).
4. Friction stir welding of aluminum alloys / P. L. Threadgill, A. J. Leonard, H. R. Shercliff, P. J. Withers // International Materials Reviews. – 2009. – V. 54, № 2. – P. 49–93.