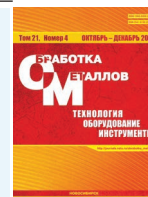




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Структура и свойства соединений медных компенсаторов, полученных по гибридной технологии с использованием сварки трением с перемешиванием

Татьяна Калашникова^{1, а}, Кирилл Калашников^{1, б, *}, Михаил Шведов^{2, с}, Пётр Васильев^{2, д}¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия² Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр. Московский, д. 15, г. Чебоксары, 428015, Россия^а  <https://orcid.org/0000-0002-0388-4011>,  gelombang@ispms.tsc.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-0286-7156>,  kkn@ispms.tsc.ru,^с  <https://orcid.org/0000-0002-5735-6134>,  shved1951@rambler.ru, ^д  <https://orcid.org/0000-0002-5147-6266>,  svarkacheb@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.1:620.184:620.178.152.
341:620.172

История статьи:

Поступила: 15 сентября 2019

Рецензирование: 14 октября 2019

Принята к печати: 15 октября 2019

Доступно онлайн: 15 декабря 2019

Ключевые слова:

Сварка трением с перемешиванием

Медный компенсатор

Структура сварного шва

Механические свойства

Финансирование

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, направление III.23.

АННОТАЦИЯ

Введение. Для компенсации температурного расширения, вибраций и вызванных ими опасных деформаций на силовых токоведущих проводниках используются специальные медные компенсаторы. Применение компенсаторов для токоведущих элементов позволяет повысить надежность, долговечность и безопасность эксплуатации силовых электротехнических устройств. Однако в настоящее время для изготовления компенсаторов используется технология ручной пайки, недостатками которой являются низкая производительность, ограниченные размеры получаемых изделий, а также зависимость качества получаемой продукции от квалификации персонала. В связи с этим актуальной задачей является разработка новых перспективных методов получения медных компенсаторов. К таким методам можно отнести сварку трением с перемешиванием. Этот вид формирования неразъемных соединений прочно занял свою нишу в корабле- и автомобилестроении, производстве корпусов ракет и в других отраслях. Сварка трением с перемешиванием разрабатывалась в первую очередь для получения неразъемных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов, однако используется и для сварки термически не упрочняемых алюминиевых сплавов, титановых сплавов, сталей и меди. Теоретические и экспериментальные исследования процесса сварки трением с перемешиванием меди демонстрируют высокую способность данной технологии для получения неразъемных соединений из меди и ее сплавов. **Целью настоящей работы** стало выявление особенностей структуры и механических характеристик медных компенсаторов, произведенных методом сварки трением с перемешиванием. **Результаты и обсуждение.** Проведенные исследования показали, что при сварке трением с перемешиванием медной монолитной пластины и медных фольг, предварительно соединенных припоём в пакет, можно получить неразъемное соединение без образования нежелательных интерметаллидных соединений. Припой замешивается в сварной шов послойно, при этом распределение припоя в зоне перемешивания неравномерно. Данные измерений микротвердости и элементного микроанализа показали, что отступающая сторона шва содержит наибольшее количество ламелей замешанного припоя. Структура пакета фольг после сварки не претерпела изменений, благодаря чему электропроводность материала также не изменилась. Испытания на растяжение показали, что разрушение компенсатора происходит не по сварному шву, а последовательным разрывом медных фольг, что позволяет заранее идентифицировать поврежденный элемент.

Для цитирования: Структура и свойства соединений медных компенсаторов, полученных по гибридной технологии с использованием сварки трением с перемешиванием / Т.А. Калашникова, К.Н. Калашников, М.А. Шведов, П.А. Васильев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 85–93. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-85-93.

Введение

Для компенсации температурного расширения, вибраций и вызванных ими опасных деформаций на силовых токоведущих проводниках используются специальные компенсаторы. При-

менение компенсаторов для токоведущих элементов позволяет минимизировать вредное воздействие на оборудование явлений, описанных выше, и тем самым повысить надежность, работоспособность, долговечность и безопасность эксплуатации силовых электротехнических устройств, снижая при этом вероятность сбоев и аварий. В связи с этим актуальной задачей является разработка компенсаторов, обладающих низким электросопротивлением и способностью

*Адрес для переписки

Калашников Кирилл Николаевич, м.н.с.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический, 2/4,

634055, г. Томск, Россия

Тел.: +7 (913) 883-69-62, e-mail: kkn@ispms.tsc.ru

работать в условиях вибраций, больших температурных перепадов и механических деформаций. К таким устройствам относятся компенсаторы, выполненные из меди и конструктивно состоящие из двух контактных пластин, соединенных пакетом фольги.

В настоящее время для изготовления компенсаторов используется технология ручной пайки. Недостатками данной технологии является низкая производительность, ограниченные размеры получаемых изделий, а также зависимость качества получаемой продукции от квалификации персонала. В связи с этим актуальной задачей становится поиск и разработка новых методов получения электротехнических изделий, в том числе компенсаторов. Наиболее перспективной усовершенствованной технологией получения медных компенсаторов при помощи соединения контактных пластин с пакетом медной фольги служит метод сварки трением с перемешиванием (СТП).

СТП является технологией формирования неразъемных соединений материалов, отличающейся от традиционных методов сварки энергоэффективностью и универсальностью. Основным принцип получения подобных неразъемных соединений заключается в следующем. Специальный инструмент, вращаясь, погружается в стык двух жестко закрепленных заготовок таким образом, чтобы плечи инструмента были прижаты к поверхности свариваемых пластин с постоянной нагрузкой. Перемещаясь вдоль линии стыка, инструмент формирует сварное соединение благодаря пластификации материала и его переносу за счет адгезионного взаимодействия [1–3]. Качество получаемых соединений напрямую зависит от параметров режима сварки, включающих в себя скорость вращения инструмента, скорость сварки, глубину погружения инструмента в стык заготовок, угол наклона, а также геометрию инструмента. Неправильно подобранные режимы могут привести к образованию ряда дефектов, которые влияют на структуру и прочность сварного соединения [4–9]. Это обусловлено тем, что комбинация параметров сварки определяет температуру процесса, которая, в свою очередь, оказывает прямое влияние на процессы динамической рекристаллизации и адгезионно-диффузионного взаимодействия инструмента со свариваемым материалом. В со-

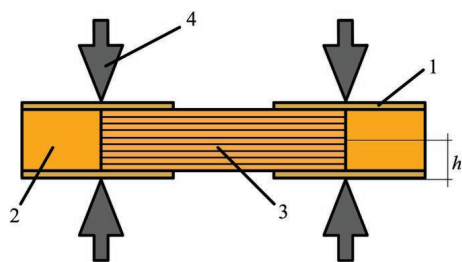
временной литературе имеется множество публикаций, посвященных сварке различных материалов методом СТП. Наиболее исследованным направлением является сварка алюминиевых сплавов, в первую очередь термически упрочняемых [10–12]. Это связано с тем, что данный класс материалов не поддается сварке традиционными методами плавления [13]. Кроме того, известны работы по сварке и обработке трением с перемешиванием сталей, титановых сплавов и меди [14–19]. Теоретические и экспериментальные исследования процесса сварки трением с перемешиванием меди демонстрируют высокую способность данной технологии для получения неразъемных соединений из меди и ее сплавов.

Таким образом, применение сварки трением с перемешиванием для получения медных компенсаторов может стать перспективным направлением в электротехнической отрасли, которое позволит повысить скорость получения изделий и улучшить их качество. Цель настоящей работы – выявление особенностей структуры и механических характеристик медных компенсаторов, произведенных методом СТП.

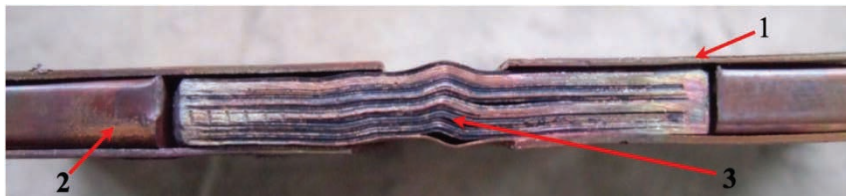
Методика исследований

Исследуемый в данной работе медный компенсатор был получен по усовершенствованной технологии в два этапа – пайкой пакета медной фольги и последующим привариванием к нему контактных пластин (рис. 1) с использованием СТП в два прохода с каждой стороны (рис. 2). Сварку компенсаторов проводили с использованием дополнительных накладных медных пластин толщиной 1,0 мм. Наибольшая толщина сборки полученного медного компенсатора с учетом дополнительных накладных медных пластин составляет 8 мм. В центре находится пакет из 34 медных фольг, а по краям – контактные пластины. Перед сваркой пакет фольг с торцов паяли припоем L-Ag2P (состав: фосфор – 6,2 %, серебро – 2,0 %, остальное медь), который необходим для подготовки пакета фольг (лент) и позволяет создать непрерывный контакт. Предельная эксплуатационная температура припоя L-Ag2P составляет 710 °С.

Для проведения структурных исследований и измерений микротвердости изготавливали специальные образцы. В поперечном сечении



a



б

Рис. 1. Сборка медного компенсатора: схема (а) и фотография (б) сборки медного компенсатора, подготовленной к сварке трением с перемешиванием:

1 – накладная медная пластина; 2 – контактная пластина; 3 – пакет медной фольги; 4 – места внедрения СТП-инструмента; h – глубина проникновения СТП-инструмента

Fig. 1. Copper compensator assembly: the scheme (a) and photography (б) of assembly preparation for friction stir welding:

1 – cover copper plate; 2 – contact plate; 3 – copper foil package; 4 – FSW-tool introduction point; h – depth of tool penetration

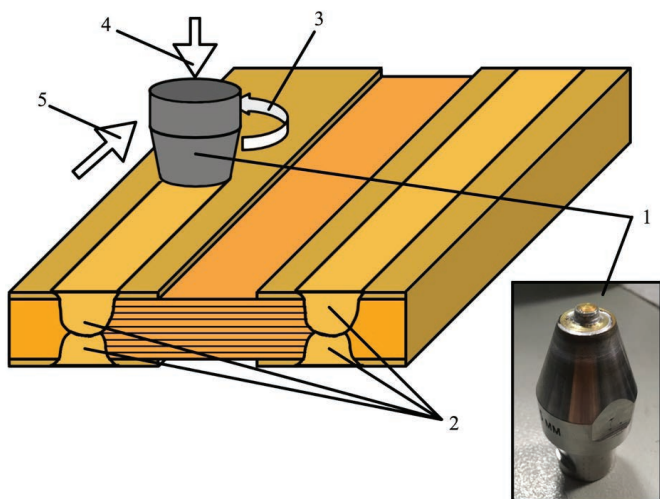


Рис. 2. Схема формирования пакетного медного компенсатора методом сварки трением с перемешиванием:

1 – СТП-инструмент; 2 – зоны перемешивания (ядро сварного соединения); 3 – направление вращения инструмента; 4 – нагружающее усилие; 5 – направление сварки

Fig. 2. The scheme of copper compensator friction stir welding:

1 – FSW-tool; 2 – stir zone (weld nugget); 3 – rotation direction; 4 – load; 5 – welding direction

готового компенсатора механическим способом вырезали образец, затем на его боковых поверхностях подготавливались металлографические шлифы с использованием шлифовальной бумаги различной зернистости и алмазной пасты. Микроструктура выявлялась после химического травления полированных шлифов 40 %-м водным раствором азотной кислоты.

Исследование структуры проводили на металлографическом микроскопе АЛТАМИ МЕТ 1С и растровом электронном микроскопе Zeiss LEO EVO 50. Микротвердость измерялась на микротвердомере Duramin 5 при нагрузке 50 г. Механические свойства соединения оценивали при испытаниях на растяжение на универсальной испытательной машине УТС 110 М-100.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлена макроструктура неразъемного соединения монолитной пластины и пакета фольг медного компенсатора в поперечном сечении. Неразъемное соединение получено двусторонней СТП. Как видно, в данном типе неразъемного соединения реализуется сплошность контакта (без полостей и пор) от каждой из фольг пакета к монолитной контактной пластине через припой и структурные зоны СТП-соединения. По отсутствию характерных контрастов можно утверждать, что в процессе СТП не произошло формирование интерметаллидных соединений во всех структурных зонах соединения. Это обусловлено несколькими факторами. Во-первых, в исходном материале заготовок из меди марки М1 фактическое содержание примесей не превышает 0,01 % вес. Во-вторых, выбранный в данном эксперименте припой состоит из химических элементов, не образующих интерметаллидных соединений с медью. Кроме того, в процессе СТП формирование соединения происходит в твердой фазе без плавления мате-

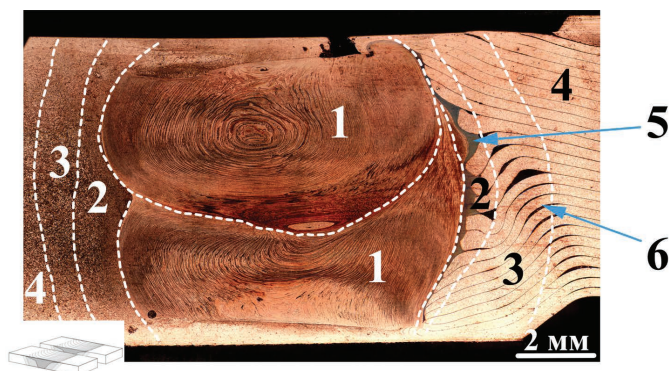


Рис. 3. Макроструктура соединения пакета медных фольг с монолитной пластиной, полученного методом сварки трением:

1 – ЗП; 2 – ЗТМВ; 3 – ЗТВ; 4 – основной металл (ОМ);
5 – припой; 6 – фольги

Fig. 3. The structure of the joint of copper foil package with monolite plate obtained by FSW method in the copper compensator:

1 – Stir Zone; 2 – Thermo-mechanical Affected Zone;
3 – Heat Affected Zone; 4 – Base metal; 5 – Solder; 6 – Foils

риала заготовок, а примененный припой способен выдерживать температурные условия СТП без плавления.

В полученном соединении выделяются характерные для СТП структурные зоны: зоны перемешивания (ЗП), зоны термомеханического воздействия (ЗТМВ), зоны термического влияния (ЗТВ) и зоны основного металла, не испытывающего воздействия процесса сварки. Частичное перекрытие однотипных структурных зон обусловлено двусторонним типом СТП-соединения. ЗП представляет собой динамически рекристаллизованный материал с измельченными по сравнению с основным металлом зернами. На рис. 3 видно, что в ЗП образуется типичная для СТП луковичная структура, представляющая собой слои перенесенного инструментом материала: вращающийся инструмент за счет адгезионного взаимодействия в процессе сварки послойно захватывает материал со стороны пакета медных фольг совместно с припоем, замешивая их слой за слоем в ЗП. Послойный перенос в структуре ЗП показан на рис. 4.

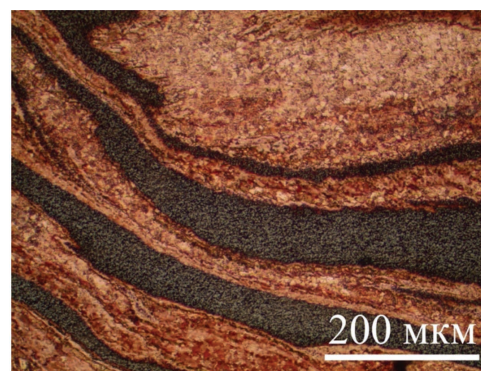


Рис. 4. Слоистая структуры зоны перемешивания меди и припоя

Fig. 4. Layered structure of the copper and solder stir zone

Исследование структуры материала компенсатора методом растровой электронной микроскопии также демонстрирует послойный характер формирования зоны перемешивания неразъемного соединения и отсутствие вредных интерметаллидных соединений. Как можно увидеть из рис. 5, перенос материала в различных участках сварного соединения происходит по-разному. Центральная часть ядра шва представлена крупными ламелями припоя, замешанными между слоями меди. При удалении в верхнюю или нижнюю часть ядра, а также с наступающей или отступающей стороны шва структура пред-

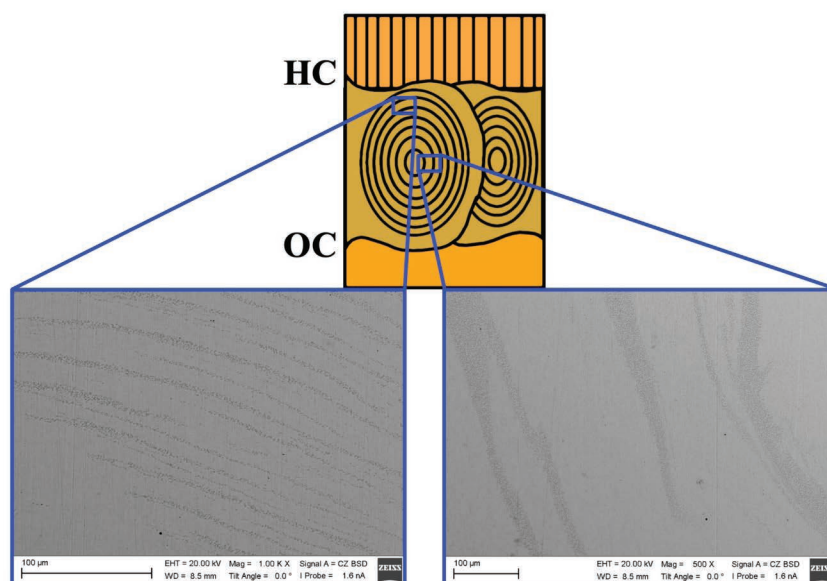


Рис. 5. РЭМ-изображения слоистой структуры в области с наступающей стороны и центральной части зоны перемешивания верхнего (второго) прохода

Fig. 5. SEM-image of the upper (second) pass stir zone layered structure in the advancing side area and central part of nugget

ставлена более тонкими слоями как меди, так и припоя. При этом стоит отметить, что в большей степени припой переносится в область отступающей стороны шва, т. е. стороны, граничащей с материалом монолитной медной пластины (ОС на рис. 5). Неравномерность распределения припоя в зоне перемешивания подтверждается и результатами элементного анализа (см. таблицу).

**Результаты элементного анализа припоя
в разных участках зоны перемешивания, ат. %**
**Elemental analysis results of solder in different parts
of the stir zone, at. %**

Участок ЗП	Фосфор, Р	Медь, Cu
Центр	4,58	95,42
НС	7,65	93,68
ОС	14,52	85,48
Верх	8,96	91,04

Можно отметить, что в разных участках шва соотношение меди и фосфора в слоях припоя отличается. Из этого можно сделать вывод, что в процессе СТП имеет место взаимная диффузия перемешиваемых материалов, причем интенсивность диффузионных процессов изменяется при удалении от стержня инструмента. Это обусловлено, прежде всего, сложным характером термомеханического воздействия в процессе сварки.

Измерение микротвердости материала компенсатора было проведено в разных участках сварного шва вдоль линий, показанных на рис. 6.

Полученные данные также демонстрируют неоднородность распределения припоя в сварном соединении. Как видно из рис. 7, наибольшая микротвердость наблюдается в центральной части зоны перемешивания верхнего прохода за счет скопления крупных ламелей припоя, что было показано на электронно-микроскопическом изображении (рис. 5). В переходной зоне между верхним и нижним проходом микротвердость распределена более равномерно, поскольку материал в данной области испытывал повторное термомеханическое воздействие и перемешивание инструментом. Стоит также отметить, что микротвердость материала с отступающей стороны шва выше, чем с наступающей, что подтверждают результаты микроскопического и элементного анализа, приведенные выше. При этом средний уровень микротвер-

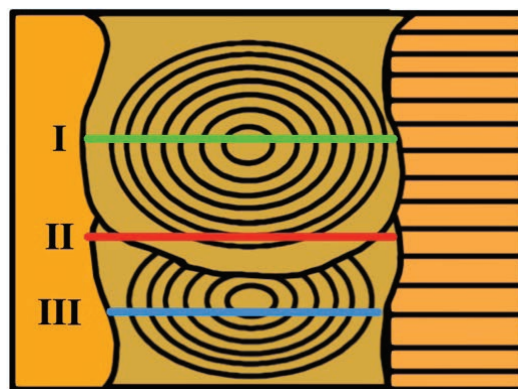


Рис. 6. Схема измерения микротвердости. Отрезками I, II и III показаны траектории, вдоль которых проводились измерения микротвердости с шагом 0,25 мм

Fig. 6. Microhardness measurement scheme. Sections I, II and III show the trajectories along which the microhardness was measured in 0.25 mm increments

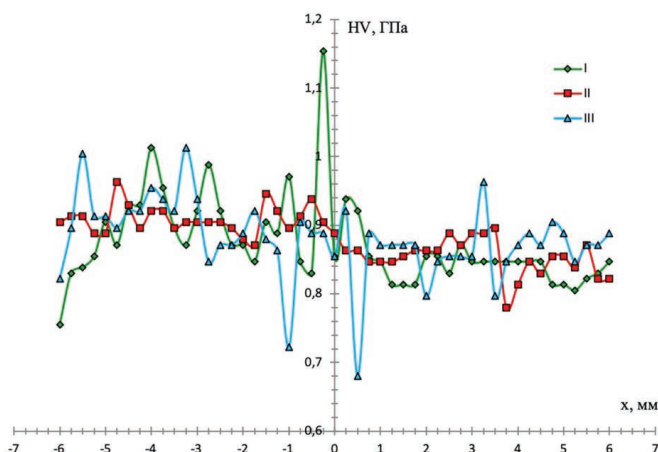


Рис. 7. Распределение микротвердости в сварном соединении медного компенсатора вдоль траекторий I, II и III

Fig. 7. Microhardness of the copper compensator weld joint along trajectories I, II and III

дости в зоне перемешивания (0,9 ГПа) хорошо коррелирует с аналогичными характеристиками меди марки М1 после интенсивной пластической деформации методом радиально-сдвиговой прокатки [20].

Механические испытания демонстрируют высокую способность материала компенсатора сопротивляться растягивающим нагрузкам. Как видно из диаграммы нагружения (рис. 8), разрушение компенсатора происходит не по сварному соединению, а последовательным разрывом фольг в пакете. Каждому падению нагрузки

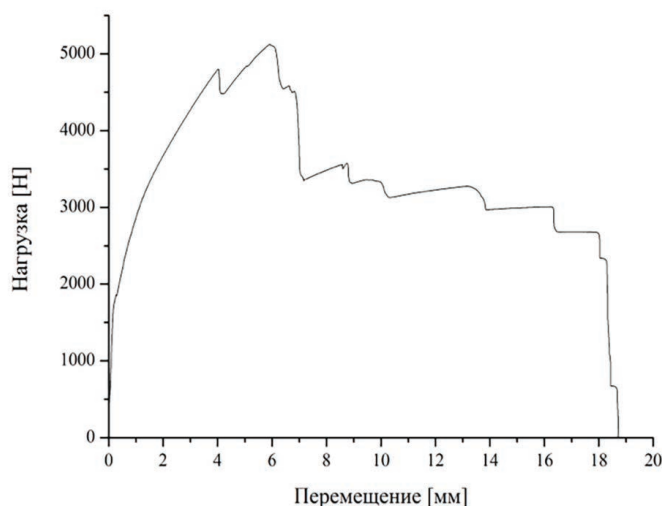


Рис. 8. Диаграмма испытания на статическое растяжение образца медного компенсатора

Fig. 8. Static tensile test diagram of copper compensator specimen

в процессе испытания соответствует разрыв одной или нескольких медных фольг. Такой характер разрушения материала свидетельствует о качестве полученного СТП-соединения. Неполноценный разрыв пакета положительно влияет на эксплуатацию компенсатора, так как становится возможным визуальное обнаружение дефекта и замена поврежденного элемента до его выхода из строя.

Полученные в данной работе результаты свидетельствуют о том, что применение сварки трением с перемешиванием для производства медных компенсаторов для электротехнической отрасли позволяет получать надежные и качественные изделия. Как показали проведенные исследования, соединение пакета фольг с монолитной контактной пластиной методом СТП позволяет избежать формирования нежелательных интерметаллических соединений, обладающих высоким электросопротивлением. При этом материал фольг не претерпевает структурных изменений, следовательно, электропроводность компенсатора остается на прежнем уровне. С использованием СТП будет возможно получать большое количество медных компенсаторов за счет возможности сварки протяженных швов за один проход с последующей резкой для получения готовых изделий. Благодаря этому удастся минимизировать влияние человеческого фактора на качество изделий и повысить скорость изготовления.

Выводы

Проведенные исследования позволили получить необходимые сведения о возможности использования технологии сварки трением с перемешиванием для производства медных компенсаторов. Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы.

В процессе сварки трением с перемешиванием исключается возможность формирования в сварном шве интерметаллидов, обладающих высоким электросопротивлением, благодаря твердофазному механизму соединения, а также отсутствию в материале формируемого соединения химических элементов, образующих интерметаллиды.

Припой в зоне перемешивания сварного шва распределяется неравномерно. Наибольшее скопление ламелей припоя наблюдается в зоне с отступающей стороны шва, что подтверждается результатами измерения микротвердости и элементного анализа.

Механические испытания образца демонстрируют, что разрушение компенсатора происходит последовательным разрывом фольг, что позволяет своевременно выявлять поврежденный элемент и производить его замену.

Структура пакета фольг после соединения с монолитной пластиной методом СТП не претерпевает изменений, благодаря чему электропроводность изделия не ухудшается.

Список литературы

1. Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy / S.Yu. Tarasov, A.V. Filippov, E.A. Kolubaev, T.A. Kalashnikova // Tribology International. – 2017. – Vol. 115. – P. 191–198. – DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.039.
2. Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. A proposed diffusion-controlled wear mechanism of alloy steel friction stir welding (FSW) tools used on an aluminum alloy // Wear. – 2014. – Vol. 318, N 1. – P. 130–134. – DOI: 10.1016/j.wear.2014.06.014.
3. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // Material Science and Engineering: R. – 2005. – Vol. 50, N 1. – P. 1–78. – DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
4. Al-Moussawi M., Smith A.J. Defects in friction stir welding of steel // Metallography, Microstructure, and Analysis. – 2018. – Vol. 7, N 2. – P. 194–202. – DOI: 10.1007/s13632-018-0438-1.

5. *AbuShanab W.S., Moustafa E.B.* Detection of friction stir welding defects of AA1060 aluminum alloy using specific damping capacity // *Materials* (Basel, Switzerland). – 2018. – Vol. 11, N 12. – P. 2437. – DOI: 10.3390/ma11122437.

6. Challenges in the detection of weld-defects in friction-stir-welding (FSW) / M.A. Wahab, M.W. Dewan, D.J. Huggett, A.M. Okeil, T.W. Liao, A.C. Nunes // *Advances in Materials and Processing Technologies*. – 2019. – Vol. 5, N 2. – P. 258–278. – DOI: 10.1080/2374068X.2019.1575713.

7. *Das B., Pal S., Bag S.* Defect detection in friction stir welding process using signal information and fractal theory // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 144. – P. 172–178. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.05.021.

8. Reduction of defects in Al-6061 friction stir welding and verified by radiography / D. Kumaravel, V.K.B. Raja, C. Potnuru, N. Polina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 197. – P. 12062. – DOI: 10.1088/1757-899X/197/1/012062.

9. Experimental study on effect of welding parameters of friction stir welding (FSW) on aluminium AA5083 T-joint / M.T.S.M. Said, D.A. Hamid, A. Ismail, S.N.N. Zainal, M. Awang, M.A. Rojan, I.M. Ikram, M.F. Makhtar // *Information Technology Journal*. – 2016. – Vol. 15. – P. 99–107. – DOI: 10.3923/ijt.2016.99.107.

10. *Khodir S.A., Shibayanagi T.* Friction stir welding of dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys // *Materials Science and Engineering: B*. – 2008. – Vol. 148, N 1. – P. 82–87. – DOI: 10.1016/j.mseb.2007.09.024.

11. Towards aging in a multipass friction stir-processed AA2024 / K.N. Kalashnikov, S.Yu. Tarasov, A.V. Chumaevskii, S.V. Fortuna, A.A. Eliseev, A.N. Ivanov // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 103. – P. 2121–2132. – DOI: 10.1007/s00170-019-03631-3.

12. Tensile strength on friction stir processed AMg5 (5083) aluminum alloy / A.V. Chumaevsky, A.A. Eliseev, A.V. Filippov, V.E. Rubtsov, S.Yu. Tarasov // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1783. – P. 5–9. – DOI: 10.1063/1.4966320.

13. Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys / P. Kah, R. Rajan, J. Martikainen, R. Suoranta // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. – 2015. – Vol. 10, N 1. – P. 26. – DOI: 10.1186/s40712-015-0053-8.

14. *Gangwar K., Ramulu M.* Friction stir welding of titanium alloys: a review // *Materials and Design*. – 2018. – Vol. 141. – P. 230–255. – DOI: 10.1016/j.matdes.2017.12.033.

15. A review of friction stir welding of steels: tool, material flow, microstructure, and properties / F.C. Liu, Y. Hovanski, M.P. Miles, C.D. Sorensen, T.W. Nelson // *Journal of Materials Science and Technology*. – 2018. – Vol. 34, N 1. – P. 39–57. – DOI: 10.1016/j.jmst.2017.10.024.

16. Friction stir welding of dissimilar aluminum alloy combinations: state-of-the-art / V. Patel, W. Li, G. Wang, F. Wang, A. Vairis, P. Niu // *Metals*. – 2019. – Vol. 9 (3). – P. 270. – DOI: 10.3390/met9030270.

17. Friction stir welding of copper: numerical modeling and validation / P. Sahlot, A.K. Singh, V.J. Badheka, A. Arora // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. – 2019. – Vol. 72 (5). – P. 1339–1347. – DOI: 10.1007/s12666-019-01629-9.

18. *Hwang Y.M., Fan P.L., Lin C.H.* Experimental study on friction stir welding of copper metals // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – Vol. 210 (12). – P. 1667–1672. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019.

19. Investigation of mechanical properties of friction stir welded pure copper plates / P. Nagabharam, D.S. Rao, J.M. Kumar, N. Gopikrishna // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5, N 1, pt. 1. – P. 1264–1270. – DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.210.

20. *Valeeva A.K., Valeev I.S.* On the microhardness and microstructure of copper Cu99,99 % at radial-shear rolling // *Letters on Materials*. – 2013. – Vol. 3 (1). – P. 38–40. – DOI: 10.22226/2410-3535-2013-1-38-40.

Конфликт интересов

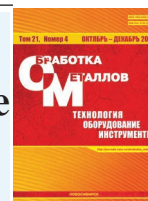
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Structure and Properties of Copper Compensator Joints obtained by Hybrid Friction Stir Welding Technology

Tatiana Kalashnikova^{1, a}, **Kirill Kalashnikov**^{1, b, *}, **Mikhail Shvedov**^{2, c}, **Petr Vasilyev**^{2, d}

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science Siberian Branch of Russian Academy of Science, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

² I. N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-0388-4011>, gelombang@ispms.tsc.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0286-7156>, kkn@ispms.tsc.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-5735-6134>, shved1951@rambler.ru, ^d <http://orcid.org/0000-0002-5147-6266>, svarkacheb@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 September 2019

Revised: 14 October 2019

Accepted: 15 October 2019

Available online: 15 December 2019

Keywords:

Friction stir welding

Copper compensator

Weld structure

Mechanical properties

Funding

This work is performed within the frame of the Fundamental Research Program of the State Academies of Sciences for 2013-2020, line of research III.23.

ABSTRACT

Introduction. Special copper compensators are used to compensate for temperature expansion, vibrations and the resulting dangerous deformations on power live conductors. Application of compensators for current-carrying elements allows to increase reliability, durability and safety of power electrical devices operation. However, now for compensators manufacturing the technology of the manual soldering is used, which lacks are low productivity, the limited sizes of received products, and also dependence of products quality on the personnel qualification. In this connection, the actual task is to develop new promising methods of obtaining copper compensators. Such methods include friction stir welding. This type of permanent joints formation is widely used in the shipbuilding and automotive industries, production of missile bodies for aerospace, and others. Friction stir welding was developed primarily for the production of permanent joints of thermally hardenable aluminum alloys, but it is also used for welding of thermally non-hardenable aluminum alloys, titanium alloys, steels and copper. Theoretical and experimental studies of friction stir welding of copper demonstrate the high ability of this technology to produce permanent joints from copper and its alloys. **The purpose of the present work** was to reveal the peculiarities of the structure and mechanical properties of copper compensators produced by friction stir welding. **Results and discussions.** The carried out researches have shown, that at friction stir welding of copper monolithic plate with copper foil, preliminary connected by soldering in a package, allows to receive a joint without formation of undesirable intermetallic compounds. Solder layers are mixed in the weld, and the distribution of solder in the stir zone is uneven. Microhardness and elemental microanalysis data showed that the retreating side of the joint contains the largest number of solder layers. The structure of the foil package has not changed after welding, so that the conductivity of the material has not changed either. Tensile tests have shown that the compensator is not fractured by the weld, but by successive rupture of the copper foil, which allows the damaged element to be identified in advance.

For citation: Kalashnikova T.A., Kalashnikov K.N., Shvedov M.A., Vasilyev P.A. Structure and properties of copper compensator joints obtained by hybrid friction stir welding technology. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 85–93. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.4-85-93. (In Russian).

References

1. Tarasov S.Yu., Filippov A.V., Kolubaev E.A., Kalashnikova T.A. Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy. *Tribology International*, 2017, vol. 115, pp. 191–198. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.039.
2. Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. A proposed diffusion-controlled wear mechanism of alloy steel friction stir welding (FSW) tools used on an aluminum alloy. *Wear*, 2014, vol. 318, no. 1, pp. 130–134. DOI: 10.1016/j.wear.2014.06.014.
3. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing. *Material Science and Engineering: R*, 2005, vol. 50, no. 1, pp. 1–78. DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001.

* Corresponding author

Kalashnikov Kirill N., Junior Staff Scientist

Institute of Strength Physics and Materials Science

Siberian Branch of Russian Academy of Science,

2/4, pr. Akademicheskii,

Tomsk, 634055, Russian Federation

Tel.: +7 (913) 883-69-62, e-mail: kkn@ispms.tsc.ru

4. Al-Moussawi M., Smith A.J. Defects in friction stir welding of steel. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2018, vol. 7, no. 2, pp. 194–202. DOI: 10.1007/s13632-018-0438-1.
5. AbuShanab W.S., Moustafa E.B. Detection of friction stir welding defects of AA1060 aluminum alloy using specific damping capacity. *Materials* (Basel, Switzerland), 2018, vol. 11, no. 12, p. 2437. DOI: 10.3390/ma11122437.
6. Wahab M.A., Dewan M.W., Huggett D.J., Okeil A.M., Liao T.W., Nunes A.C. Challenges in the detection of weld-defects in friction-stir-welding (FSW). *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2019, vol. 5, no. 2, pp. 258–278. DOI: 10.1080/2374068X.2019.1575713.
7. Das B., Pal S., Bag S. Defect detection in friction stir welding process using signal information and fractal theory. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 144, pp. 172–178. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.05.021.
8. Kumaravel D., Raja V.K.B., Potnuru C., Polina N. Reduction of defects in Al-6061 friction stir welding and verified by radiography. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 197, p. 12062. DOI: 10.1088/1757-899X/197/1/012062.
9. Said M.T.S.M., Hamid D.A., Ismail A., Zainal S.N.N., Awang M., Rojan M.A., Ikram I.M., Makhtar M.F. Experimental study on effect of welding parameters of friction stir welding (FSW) on aluminium AA5083 T-joint. *Information Technology Journal*, 2016, vol. 15, pp. 99–107. DOI: 10.3923/itj.2016.99.107.
10. Khodir S.A., Shibayanagi T. Friction stir welding of dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: B*, 2008, vol. 148, no. 1, pp. 82–87. DOI: 10.1016/j.mseb.2007.09.024.
11. Kalashnikov K.N., Tarasov S.Yu., Chumaevskii A.V., Fortuna S.V., Eliseev A.A., Ivanov A.N. Towards aging in a multipass friction stir-processed AA2024. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 103, pp. 2121–2132. DOI: 10.1007/s00170-019-03631-3.
12. Chumaevsky A.V., Eliseev A.A., Filippov A.V., Rubtsov V.E., Tarasov S.Yu. Tensile strength on friction stir processed AMg5 (5083) aluminum alloy. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1783, pp. 5–9. DOI: 10.1063/1.4966320.
13. Kah P., Rajan R., Martikainen J., Suoranta R. Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2015, vol. 10, no. 1, p. 26. DOI: 10.1186/s40712-015-0053-8.
14. Gangwar K., Ramulu M. Friction stir welding of titanium alloys: a review. *Materials and Design*, 2018, vol. 141, pp. 230–255. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.12.033.
15. Liu F.C., Hovanski Y., Miles M.P., Sorensen C.D., Nelson T.W. A review of friction stir welding of steels: tool, material flow, microstructure, and properties. *Journal of Materials Science and Technology*, 2018, vol. 34, no. 1, pp. 39–57. DOI: 10.1016/j.jmst.2017.10.024.
16. Patel V., Li W., Wang G., Wang F., Vairis A., Niu P. Friction stir welding of dissimilar aluminum alloy combinations: state-of-the-art. *Metals*, 2019, vol. 9 (3), pp. 270. DOI: 10.3390/met9030270.
17. Sahlot P., Singh A.K., Badheka V.J., Arora A. Friction stir welding of copper: numerical modeling and validation. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2019, vol. 72 (5), pp. 1339–1347. DOI: 10.1007/s12666-019-01629-9.
18. Hwang Y.M., Fan P.L., Lin C.H. Experimental study on friction stir welding of copper metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210 (12), pp. 1667–1672. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.05.019.
19. Nagabharam P., Rao D.S., Kumar J.M., Gopikrishna N. Investigation of mechanical properties of friction stir welded pure copper plates. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 1, pt. 1, pp. 1264–1270. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.210.
20. Valeeva A.K., Valeev I.S. On the microhardness and microstructure of copper Cu99,99% at radial-shear rolling. *Letters on Materials*, 2013, vol. 3 (1), pp. 38–40. DOI: 10.22226/2410-3535-2013-1-38-40.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).