

## Соединение разнородных металлов сваркой трением с перемешиванием (Cu-Al)\*

**Е. С. Бубенок**

(Донской государственный технический университет)

Целью данной работы является анализ существующих способов получения соединений меди и алюминия. Предметом изучения было исследование возможности применения сварки трением с перемешиванием (СТП) для получения соединений меди и алюминия. Описан процесс получения нахлесточных соединений меди и алюминия, приведены режимы сварки. Проведены исследования микроструктуры нахлесточных соединений меди и алюминия. Проанализированы факторы, влияющие на прочность нахлесточных соединений меди с алюминием, выполненных СТП. Изучено влияние рифления и остающегося отверстия на прочность полученного соединения. Приведены эпюры распределения напряжений в нахлесточных соединениях меди и алюминия. Представлены результаты испытаний на прочность различных нахлесточных соединений, проанализирована структура среза шва, оценена его технологичность и приведён способ повышения прочности соединения.

**Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием, сварка разнородных металлов, медь, алюминий, электрические шины.

**Введение.** В современном электромонтажном производстве часто требуется соединение разнородных металлов. Примером может служить соединение токоведущих шин (материал — медь) и отводов (материал — алюминий) [1, 2].

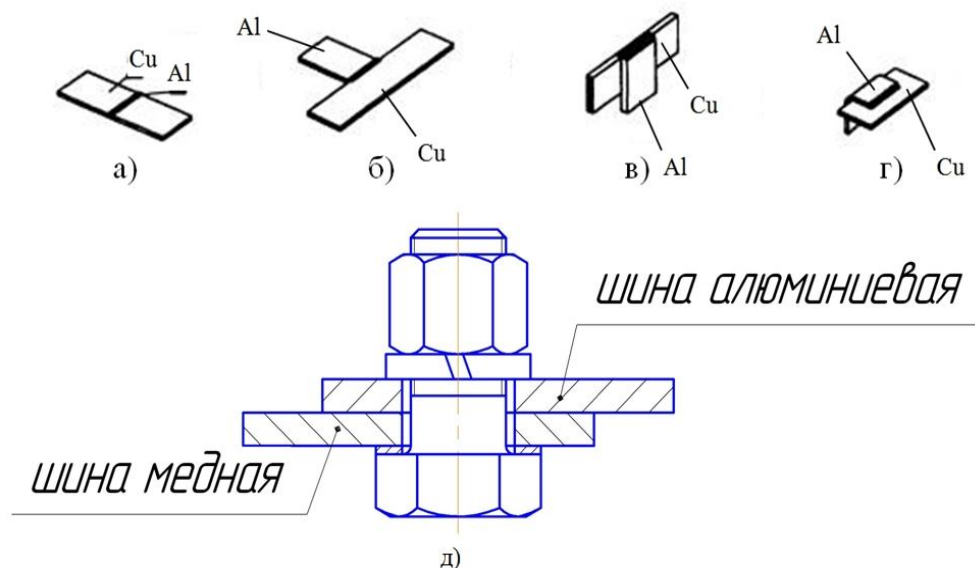


Рис. 1. Примеры соединений медной и алюминиевой шин сваркой плавлением встык (а, б), внахлест (в, г) и с помощью болта (д)

От таких соединений, в основном, требуется обеспечение высокой прочности и электропроводности. Сварка таких соединений в жидкой фазе крайне затруднена. Основными проблемами, возникающими при получении качественных сварных соединений в жидкой фазе, являются: – значительное различие физико-химических свойств алюминия и меди (табл. 1) [3];

\* Работа выполнена в рамках договора № 92 от 03.05.2011 г.

- образование хрупких интерметаллидных фаз ( $\text{CuAl}_2$ ) [4];
- необходимость очистки поверхности как алюминия, так и меди и нанесения активирующего покрытия на последнюю (например, цинковое покрытие толщиной 50...60 мкм, наносимое гальваническим методом).

Таблица 1

**Физико-химические свойства алюминия и меди**

Свойство вещества	Значение	
	Алюминий	Медь
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,7	8,92
Температура плавления, °С	660	1083
Теплопроводность, Вт/(м·К)	203,5	401
Электропроводность, см/м	$37 \cdot 10^6$	$58,1 \cdot 10^6$
Временное сопротивление разрыву, кг/мм <sup>2</sup>	Литой 10—12, деформируемый 18—25	25—29
Модуль Юнга, $10^5$ кгс/см <sup>2</sup>	7,1	12,5
Температурный коэффициент линейного расширения 1/°С	$16 \cdot 10^{-6}$	$24 \cdot 10^{-6}$

В результате в промышленности часто используют нахлесточные соединения меди с алюминием с помощью болтов [1]. Пример такого соединения приведён на рис. 1, д.

Однако данное соединение имеет свои недостатки:

- уменьшается сечение детали, что приводит к снижению прочности и электропроводности;
- места контакта постепенно окисляются, увеличивается переходное сопротивление. В результате появляется необходимость регулярного обслуживания данного соединения (зачистка контактирующих поверхностей от окислов, подтяжка болтов).

Работа посвящена увеличению прочности и электропроводности разнородных соединений (Cu + Al) токоведущих шин.

**Выбор способа сварки.** С целью получения качественных неразъёмных соединений меди с алюминием было предложено использовать хорошо зарекомендовавшую себя технологию СТП [5]. Использование данного способа, при котором сварка протекает в твёрдой фазе [6], должно исключить проблемы присущие традиционным способам сварки плавлением [4, 7, 8]. Инструмент для СТП и схема сварки нахлесточного соединения представлены на рис. 2.

Качество соединений, выполняемых СТП, во многом зависит от конструкции инструмента [9, 10] и параметров режима сварки [5]. В данной работе используется довольно простой инструмент, который состоит из цилиндра с плоским заплечиком (рис. 2, а), причём в центре заплечика расположен конус, который называется пином.

Параметры, характеризующие данный процесс сварки, и их величины представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Параметры процесса СТП**

№	Параметры СТП	Обозначение	Величина
1.	Скорость вращения инструмента, об/мин	$\omega$	710
2.	Усилие прижатия инструмента, кН	$P_z$	4
3.	Глубина погружения инструмента, мм	$h$	0,3
4.	Угол наклона инструмента, град	$\alpha$	2
5.	Скорость сварки, м/ч	$V_{св}$	2,4

Процесс сварки осуществляется следующим образом (рис. 2, б). Инструмент, наклонённый на угол  $\alpha$ , вращаясь со скоростью  $\omega$ , с усилием равным  $P_z$  погружается в свариваемый металл до тех пор, пока заплечики не войдут в основной металл на глубину  $h$ . При этом за счёт трения заплечиков о наружную поверхность соединяемых деталей, а пина о внутренние поверхности деталей происходит нагрев будущего соединения. Это сопровождается повышением пластичности и

снижением сопротивления деформации металла в приконтактных зонах. При определённых температурно-скоростных условиях металл переходит в вязкопластическое состояние, после чего изделие начинает перемещаться относительно инструмента со скоростью сварки  $V_{св}$ . Вращение инструмента, приложение к нему силы  $P_z$  и перемещение изделия со скоростью  $V_{св}$  приводит к интенсивному перемешиванию металла, а так как пин находится в замкнутом объёме пластифицированного металла, то при его движении со скоростью сварки он вызывает механическое многократное разрушение находящегося впереди металла, его тонкое измельчение и интенсивную пластическую деформацию. При этом происходит разрушение окисных плёнок на поверхностях соединяемых деталей и их перемешивание по всему объёму металла, находящемуся в вязкопластичном состоянии. Пин за счёт сил трения и адгезии захватывает находящийся впереди пластифицированный металл, и переносит его к задней кромке инструмента. За счёт интенсивного перемешивания пластифицированного металла и приложения к нему давления задней кромки заплечиков за инструментом образуется сварной шов.

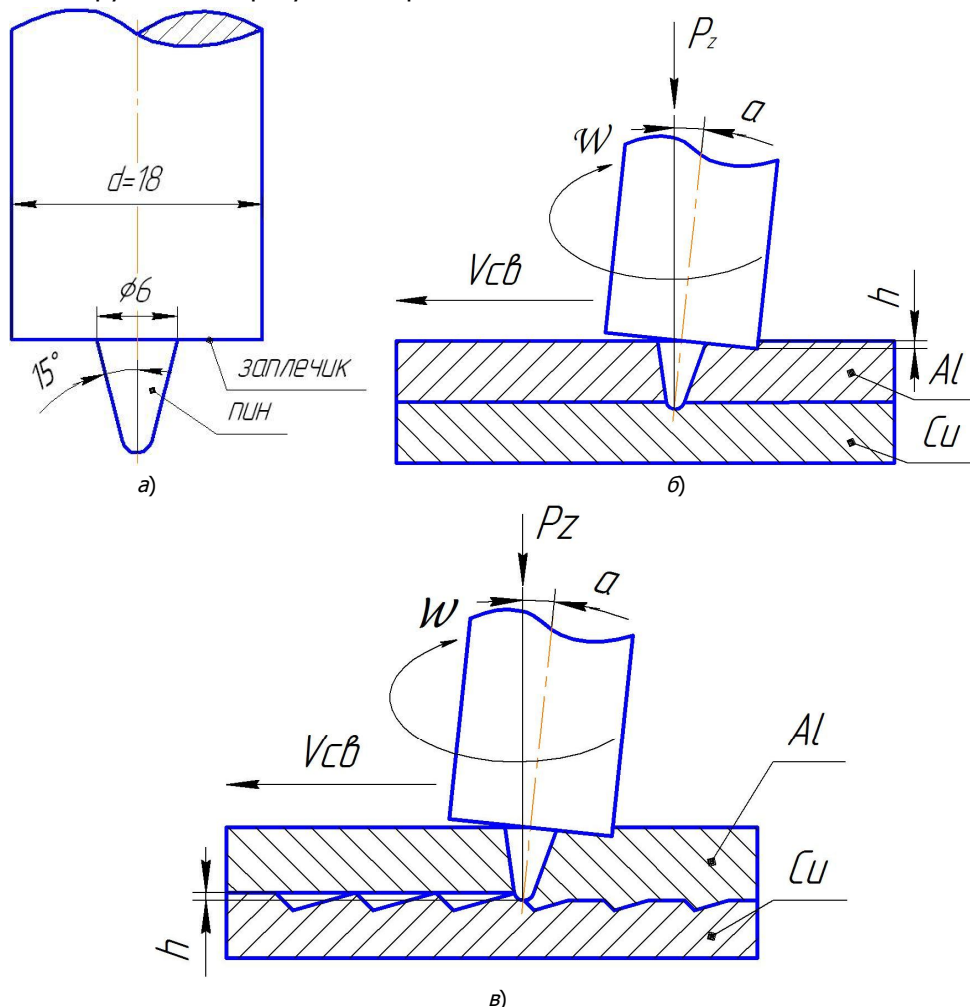


Рис. 2. Сварка трением с перемешиванием: а — конструкция инструмента; б — схема сварки нахлесточного соединения без рифления; в — схема сварки нахлесточного соединения с рифлением

Преимуществами данного способа сварки перед сваркой плавлением является то, что температура соединяемых металлов не достигает температуры плавления, а также упрощение процесса получения соединения в целом.

Преимуществами перед болтовыми соединениями является более плотное прилегание соединяемых деталей и отсутствие сквозных отверстий, приводящих к уменьшению сечения соединяемых деталей.

Нахлесточное соединение, полученное СТП на режимах, указанных в таблице 2, показано на рис. 3, а.

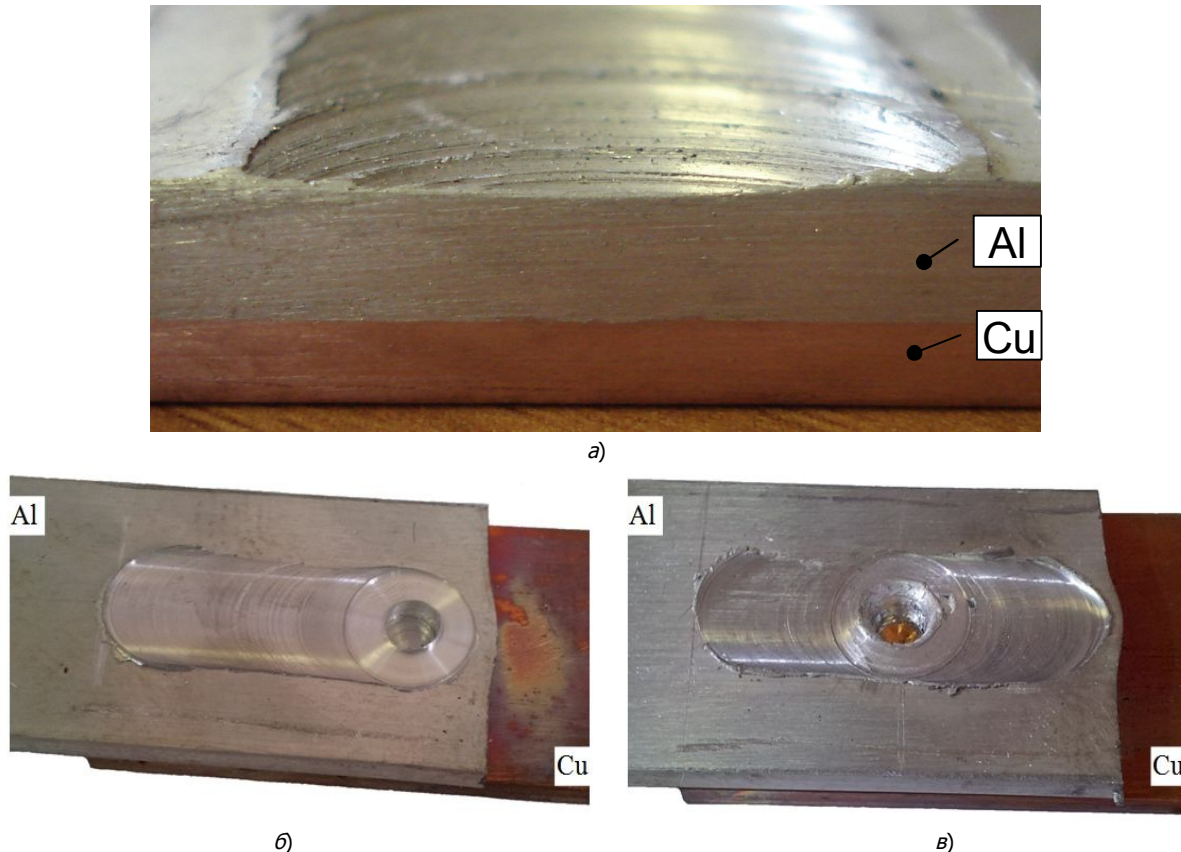


Рис. 3. Сварное соединение меди с алюминием, полученное способом СТП: а — срез соединения; б — соединение с отверстием со стороны медной шины; в — соединение с отверстием посередине

Металлографические исследования показали, что при СТП существует довольно узкая зона соединения (порядка 20 мкм), при этом отдельные частицы меди внедряются в алюминиевую матрицу (рис. 4, а), прочность этого соединения составила 30—40 МПа.

Для увеличения прочности соединения автором предложено на поверхность меди, контактирующую с алюминиевым сплавом, наносить рифление, а затем выполнять СТП. Сварка проводилась таким образом, чтобы пин погружался до середины высоты рифления (рис. 2, в). Параметры процесса представлены в таблице 2. Проведённое металлографическое исследование данного соединения показало рост числа частиц меди перемешанных с алюминием (рис. 4, б) и увеличения слоя взаимодействия до 50 мкм.

Однако, нахлесточные соединения выполненные СТП имеют недостатки:

- в конце шва в верхней детали остаётся отверстие, повторяющее форму пина;
- фланговые и лобовые швы должны находиться от краёв нахлестки на расстоянии равном диаметру заплечиков (а) инструмента (рис. 5, а).

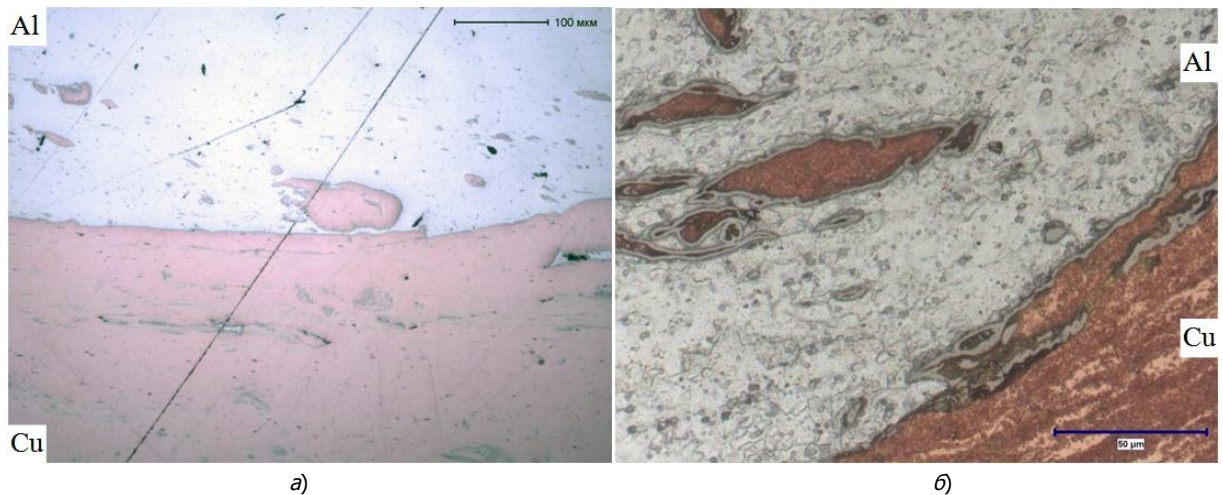


Рис. 4. Металлографическое исследование нахлесточного соединения алюминий-медь: *а* — медная деталь без рифления и *б* — медная деталь с рифлением

При выполнении нахлесточных соединений полос одинаковой площади одним фланговым швом (рис. 5, *а*) его прочность зависит от площади соединения равной  $l \cdot c$ , от распределения касательных напряжений в зоне сопряжения и от распределения нормальных напряжений в алюминиевой и медной пластинах площадью  $c \cdot S$  (при отсутствии отверстия от пина).

Для оценки влияния расположения отверстия на прочность соединения была построена модель сечения сварного соединения. С помощью метода конечных элементов была проведена оценка распределения напряжений по сечению шва. Результат распределений напряжений в различных зонах нахлесточного соединения представлен на рис. 5.

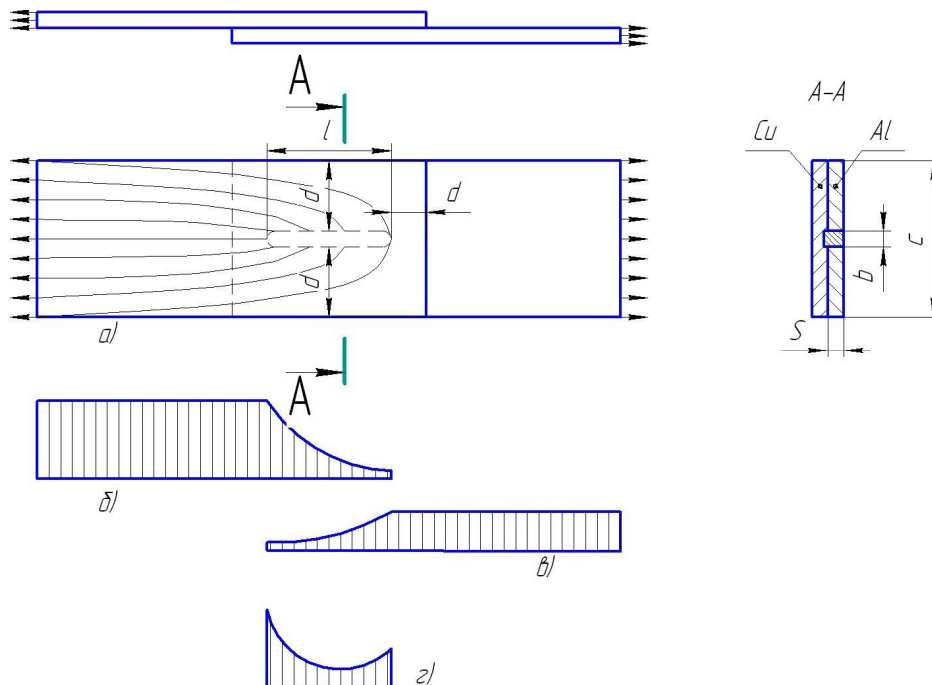


Рис. 5. Распределение напряжений в нахлесточном соединении: *а* — общий вид нахлесточного соединения и распределение напряжений по поверхности алюминиевой полосы (отверстие от пина отсутствует); *б* — распределение нормальных напряжений по длине медной пластины; *в* — распределение нормальных напряжений по длине алюминиевой пластины; *г* — распределение касательных напряжений по длине флангового шва, с учётом разного модуля упругости соединяемых материалов

Для оценки несущей способности нахлесточного соединения с остающимся отверстием были изготовлены соединения с различным расположением отверстий (рис. 3, б, в). Ввиду того, что напряжения при выводе отверстия в сторону алюминия (рис. 5, б) выше, чем при расположении отверстия со стороны меди (рис. 5, в) или в середине нахлестки (рис. 5, г), прочность такого соединения оказалась ниже и составила 50—70 МПа.

Результаты испытаний различных соединений на срез представлены в таблице 3.

Таблица 3

### Результаты испытаний на прочность соединений полученных СТП

№	Вид образца	Предел прочности при испытаниях на срез, МПа
1.	Нахлесточное соединение без рифления (отверстие со стороны меди)	30—40
2.	Нахлесточное соединение с рифлением (отверстие со стороны алюминия)	50—70
3.	Нахлесточное соединение с рифлением (отверстие со стороны меди)	90—110
4.	Нахлесточное соединение с рифлением (отверстие в середине соединения)	90—110

Следует подчеркнуть, что прочность соединений 3 и 4 (по табл. 3) практически равняется прочности алюминиевой пластины. Разница в прочности соединений 3 и 4 оказалась незначительной. Следовательно, с технологической точки зрения целесообразней производить сварку таким образом, чтобы отверстие оставалось со стороны подхода медной шины.

#### Выводы.

- 1) Сварка трением с перемешиванием позволяет получить надёжное нахлесточное соединение меди с алюминием.
- 2) В результате СТП происходит: а) измельчение структуры соединяемых металлов в сварном шве, б) отрыв частиц меди и их перемешивание с алюминием.
- 3) Применение швов направленных от алюминия к меди позволяет снизить негативное воздействие остающегося отверстия на прочность соединения.
- 4) Нанесение рифления на более твёрдую деталь позволяет увеличить прочность соединения, как за счёт увеличения площади, так и за счёт увеличения толщины переходного слоя.

#### Библиографический список

1. Дзецкер, Н. Н. Многоамперные контактные соединения / Н. Н. Дзецкер, Ю. С. Висленев. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1987. — 128 с.
2. Инструкция по сварке цветных металлов в электромонтажном производстве : И 1.10-07 — 2007 : утв. президентом ассоциации «Росэлектромонтаж» 03.07.07 : ввод в действие 01.09.07 — Москва : 2007. — 143 с.
3. Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. — Москва : Мир, 1985. — 250 с.
4. Моисеенко, В. П. Материалы и их поведение при сварке / В. П. Моисеенко. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2009. — 300 с.
5. Friction Stir Butt Welding : U. S. Patent No. 5 460 317 / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham. — 1991.
6. Котлышев, Р. Р. Сварка трением с перемешиванием / Р. Р. Котлышев. — Ростов-на-Дону : Изд. центр Дон. гос. техн. ун-та, 2012. — 135 с.
7. Friction Stir Welding. — Режим доступа : <http://www.twi.co.uk/technologies/welding-coating-and-material-processing/friction-stir-welding/> (дата обращения : 05.08.2013).
8. Santella, M. L. Friction Stir Welding and Processing of Advanced Materials / M. L. Santella [et al.] // High Strength Weight Reduction Materials. FY 2004 Progress Report. — P. 11.
9. Khaled, T. An outsider looks at friction stir welding [Report# : ANM-112N-05-06] / Terry Khaled. — July 2005. — Lakewood, CA, USA. — p. 71.

10. Ericsson, M. Fatigue of FSW Overlap Joints in Aluminium Welded With Different Tool Designs / M. Ericsson, R. Sandstrom // 5-th International Symposium on Friction Stir Welding. — Metz, France, 14—16 September 2004. — P. 15.

Материал поступил в редакцию 28.05.2013.

## References

1. Dzetsker, N. N., Vislenev, Y. S. Mnogoampernyye kontaktnyye soyedineniya. [High-amperage contact joints.] Leningrad : Energoatomizdat, 1987, 128 p. (in Russian).
2. Instruksiya po svarke tsvetnykh metallov v elektromontazhnom proizvodstve : I 1.10-07 — 2007: utv. prezidentom assotsiatsii «Roselektromontazh» 03.07.07 : vvod v deystviye 01.09.07. [Welding instruction for nonferrous metals in electric-installation production : appr. by "Roselektromontazh" Association president 03.07.07 : start time 01.09.07.] Moscow : 2007, 143 p. (in Russian).
3. Kukhling, K. Spravochnik po fizike. [Handbook in Physics.] Moskva : Mir, 1985. — 250 s. (in Russian).
4. Moiseyenko, V. P. Materialy i ikh povedeniye pri svarke. [Materials and their behavior under welding.] Rostov-na-Donu : Feniks, 2009, 300 p. (in Russian).
5. Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C. Friction Stir Butt Welding : U.S. Patent No. 5 460 317, 1991.
6. Kotlyshev, R. R. Svarka treniyem s peremeshivaniyem. [Friction stir welding.] Rostov-na-Donu : DSTU Publ. Centre, 2012, 135 p. (in Russian).
7. Friction Stir Welding. Available at : <http://www.twi.co.uk/technologies/welding-coating-and-material-processing/friction-stir-welding/> (accessed : 05.08.2013).
8. Santella, M. L., et al. Friction Stir Welding and Processing of Advanced Materials. High Strength Weight Reduction Materials. FY 2004 Progress Report, p. 11.
9. Khaled, T. An outsider looks at friction stir welding [Report #: ANM-112N-05-06]. Lakewood, CA, USA, July 2005, p. 71.
10. Ericsson, M., Sandstrom, R. Fatigue of FSW Overlap Joints in Aluminium Welded With Different Tool Designs. 5-th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France, 14—16 September 2004, p. 15.

## DISSIMILAR METALS CONNECTION THROUGH FRICTION STIR WELDING (CU-AL)\*

**E. S. Bubenok**

(Don State Technical University)

*The aim of the paper is to analyze the existing techniques of producing copper and aluminum compounds. The subject matter was to study the possibility of using FSW for producing copper and aluminum compounds. The process of producing the copper and aluminum lap joints is described, welding conditions are discussed. The copper and aluminum overlap joints microstructure is investigated. The factors affecting the strength of copper and aluminum lap joints implemented through FSW are analyzed. The corrugation effect is investigated, and the remaining hole is studied to the strength of the welded joint. Stress distribution diagrams in the copper and aluminum lap joints are shown. The tests to the strength of various lap joints are resulted, the weld cut structure is analyzed, its processibility is estimated, and the joint strength improvement method is presented.*

**Keywords:** friction stir welding, welding of dissimilar metals, copper, aluminum, electric buses.

---

\* The reseach is donewithin the frame of Contract No 92 of 03.05.2011.