

УДК 621.791.13: 620.17:621.317.33

ПРО ИСПЫТАНИЯ МЕДНО-АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАКИРОВАНИЕМ ВЗРЫВОМ

В. Г. Загорянский, В. В. Драгобецкий, В. В. Костин

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

В. М. Бугайчук

ООО "АВМ Ампер"

ул. Красина, 6, г. Кременчуг, 39605, Украина.

Для производителя электротехнического оборудования ООО "АВМ Ампер" разработана ресурсосберегающая технология изготовления слоистой медно-алюминиевой композиции плакированием взрывом. Материал основы – лист алюминия АД0 толщиной 8 мм, плакирующего слоя – лист меди М1 толщиной 2 мм. Взрывчатое вещество – смесь аммонита № 6ЖВ и гранулированной аммиачной селитры в соотношении 1:1. Испытания механических и электрофизических свойств полученных композиций показали приемлемые с качественной и количественной точки зрения значения этих свойств, таких как угол изгиба, прочность на отрыв слоев, сопротивление биметалла срезу, переходное электрическое сопротивление. Результаты испытаний позволяют использовать разработанную технологию в промышленном масштабе.

Ключевые слова: медно-алюминиевая композиция, плакирование взрывом, механические и электрофизические свойства.

ПРО ВИПРОБУВАННЯ МІДНО-АЛЮМІНІЄВИХ КОМПОЗИЦІЙ, ОТРИМАННИХ ПЛАКУВАННЯМ ВИБУХОМ

В. Г. Загорянский, В. В. Драгобецкий, В. В. Костин

Кременчугський національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

В. М. Бугайчук

ТОВ "АВМ Ампер"

вул. Красина, 6, м. Кременчук, 39605, Україна.

Для виробника електротехнічного устаткування ТОВ "АВМ Ампер" розроблена ресурсозберігаюча технологія виготовлення шаруватої мідно-алюмінієвої композиції плакуванням вибухом. Матеріал основи – лист алюмінію АД0 завтовшки 8 мм, шару плакіровки – лист міді М1 завтовшки 2 мм. Вибухова речовина – суміш амоніту № 6ЖВ і гранульованої аміачної селітри у співвідношенні 1:1. Випробування механічних і електрофізичних властивостей отриманих композицій показали прийнятні з якісної і кількісної точки зору значення цих властивостей, таких як кут вигину, міцність на відрив шарів, опір біметалу зрізу, перехідний електричний опір. Результати випробувань дозволяють використати розроблену технологію в промисловому масштабі.

Ключові слова: мідно-алюмінієва композиція, плакування вибухом, механічні і електрофізичні властивості.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. При производстве электротехнического оборудования на предприятиях Украины, в частности на предприятии "АВМ Ампер" (г. Кременчуг), выпускающем высоковольтную аппаратуру, в качестве токоподводящих шин используются медные листы. В связи с дороговизной листовой меди (цена листового проката меди М1 составляет около 100 грн./кг) возникла необходимость в замене медных листов аналогичным или близким по проводящим свойствам материалом.

Опыт использования в энергетике, электрометаллургии и других отраслях биметаллических медно-алюминиевых токоподводящих элементов [1–3] позволяет считать перспективным использование биметалла алюминий–медь при производстве электротехнического оборудования.

Основой технологического процесса получения таких элементов является изготовление биметаллических листов толщиной 8–10 мм плакированием взрывом с последующей их холодной прокаткой до требуемой толщины. Из полученных листов вырезаются либо штампуются готовые изделия нужных типоразмеров и форм.

Плакирование взрывом обеспечивает высокие электрофизические характеристики, а также надежные механические свойства биметаллических проводников, а также меньшую массу и более высокую коррозионную стойкость, чем у монометалла.

Цель работы – разработка технологии плакирования взрывом слоистой медно-алюминиевой композиции и исследование механических и электрофизических свойств полученных композиций.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Задача состояла в том, чтобы плакированием взрывом получить медно-алюминиевую композицию при таких требованиях: материал основы (неподвижной пластины) – лист алюминия АД0 толщиной 8 мм, материал плакирующего слоя (метаемой пластины) – лист меди М1 толщиной 2 мм.

Использовались пластины из листового проката алюминия (межгосударственный стандарт ГОСТ 21631–76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия) марки АД0 (межгосударственный стандарт ГОСТ 4784–97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки) толщиной 8 мм, размеры в плане – 400×100 мм.

Использовались пластины из листового проката меди (межгосударственный стандарт ГОСТ 495–92. Листы и полосы медные. Технические условия) марки М1 (ГОСТ 859–2001. Медь. Марки) толщиной 2 мм, размеры в плане – 400×100 мм.

Технологический процесс подготовки к плакированию взрывом и непосредственно плакирования сравнительно небольших по размерам пластин состоит из следующих основных операций [4, 5]:

- 1) выбор схемы плакирования и расчет его режимов;
- 2) подготовка контактных поверхностей к плакированию;
- 3) подготовка основания и установка пакета из соединяемых пластин;
- 4) подготовка заряда взрывчатого вещества (ВВ) и его установка (засыпка) на метаемую пластину;
- 5) монтаж электровзрывной цепи;
- 6) непосредственное плакирование пакета.

При плакировании листов меди на листы алюминия была применена прямая схема с параллельным расположением пластин без бокового нависания.

При прямой схеме на опоре (грунте, бетоне, металлической плите) располагают более толстую неподвижную (основную) пластину, над которой с определенным зазором параллельно или под небольшим углом α располагают более тонкую метаемую пластину (плакирующий слой) (рис. 1).

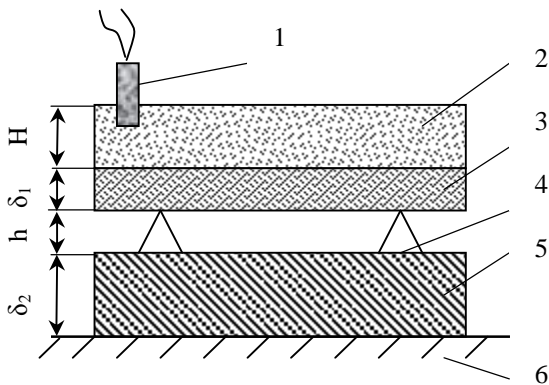


Рисунок 1 – Параллельная схема плакирования металлов взрывом: 1 – детонатор; 2 – заряд ВВ; 3 – метаемая пластина; 4 – установочный элемент; 5 – основная пластина; 6 – основание

В качестве основания использовалась стальная плита толщиной 30 мм с размерами в плане 1000×500 мм.

На подготовленное основание укладывалась нижняя (неподвижная) пластина, а затем с определенным зазором параллельно устанавливалась метаемая пластина.

Величина зазора определяется в основном толщиной метаемой пластины, обычно ее принимают равной $h = (1-1,5)\delta_1$ [4, 5]. Зазор был принят равным толщине метаемой медной пластины (2 мм).

Требуемый зазор между листами обеспечивают установкой каких-либо опор (проставок) по всей поверхности с определенным интервалом. В качестве опор применялись спички без головок.

В связи с тем, что листы основного и плакирующего слоя являются холоднокатаным материалом, изначально имеющим удовлетворительные геометрические свойства поверхности и низкую шерохова-

тость, их поверхность подвергалась шлифовке до необходимой шероховатости $Ra \leq 6,3$ мкм [6], при этом одновременно поверхность освобождалась от имеющихся окисных пленок.

Важным этапом подготовки контактных поверхностей к плакированию является обезжиривание. Наибольшее распространение при сварке взрывом получили органические растворители [6]. Обезжиривание выполнялось акириловым растворителем.

После установки метаемой пластины на ней располагают контейнер (коробку) под заряд взрывчатого вещества, высота бортов которого равна требуемой толщине слоя заряда. Высота контейнера рассчитывается по зависимости [6]:

$$H = \frac{27}{8} d_1 \frac{r_1}{r_g} \frac{v_{\max}}{D} \left(1 - \frac{v_{\max}}{D} \right)^{-2}, \quad (1)$$

где v_{\max} на 20–40 % превышает скорость метания.

Для взрывчатого вещества был изготовлен из картона контейнер по контуру свариваемых пластин высотой 30 мм (по расчету получено 27 мм).

Использовалось взрывчатое вещество, широко применяемое при плакировании взрывом, – смесь аммонита № 6ЖВ и гранулированной аммиачной селитры в соотношении 1:1.

Высота слоя взрывчатого вещества была принята равной 25 мм.

Непосредственно на метаемую пластину укладывался заряд взрывчатого вещества и устанавливался детонатор. Применялся электродетонатор ЭД–8ПМ, установленный в центре засыпанного в картонный контейнер взрывчатого вещества.

Режимы сварки взрывом, принятые на основе экспериментального и производственного опыта, и проверенные экспериментально, обеспечили получение сварного шва требуемой геометрии и достаточной прочности.

После разрезания на гильотинных ножницах получены слоистые композиции, показанные на рис. 2.



Рисунок 2 – Полученные плакированием взрывом слоистые медно-алюминиевые композиции

Механические испытания полученных медно-алюминиевых композиций проводились в соответствии с методиками для биметаллов [5, 7].

Испытание на изгиб служит для определения способности металла выдерживать заданную пластическую деформацию, характеризуемую углом изгиба или (для оценки предельной пластичности металла при изгибе) углом изгиба до образования первой трещины.

Испытания на изгиб с помощью ударного штампа на оправке радиусом 5 мм медным слоем наружу четырех образцов размерами 10×15×200 мм (принято в соответствии с [2]) показали, что угол предельный угол изгиба $\alpha_{и}$ во всех случаях превышает 25°.

Изменение прочности на отрыв слоев медно-алюминиевого композита показало, что $\sigma_{отр}$ для четырех образцов лежит в пределах 80–95 МПа.

Испытание на срез соединений показало, что разрыв соединения происходит не по шву, а по наименее прочному материалу пары - алюминию, прочность на разрыв составила 88–65 МПа, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к биметаллу.

Для исследования закономерностей изменения переходного электрического сопротивления медно-алюминиевого биметалла в зависимости от технологических факторов и термических воздействий была использована прецизионная методика [2, 8], суть которой заключается в непосредственном измерении падения напряжения в исследуемом образце при пропускании через него постоянного тока известной величины (рис. 3, 4).

Исследование электрофизических характеристик проводили на специальных П-образных образцах (рис. 3), вырезанных из сваренной взрывом заготовки и содержащих биметаллическую часть и выводы крепления токоподвода со строго фиксированными линейными размерами, которые измеряли на оптическом микроскопе ПМТ-3.

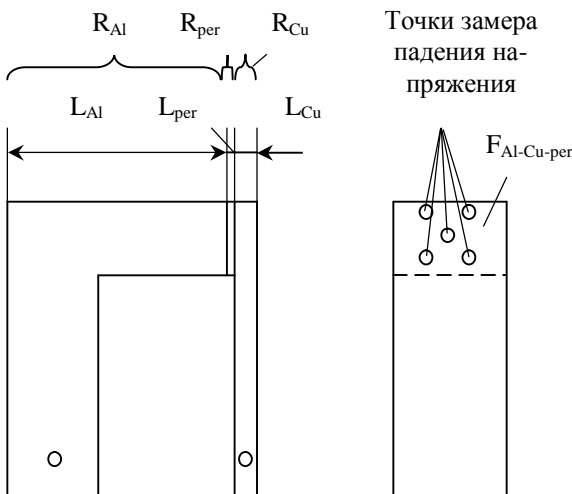


Рисунок 3 – Биметаллический образец для измерения переходного электрического сопротивления

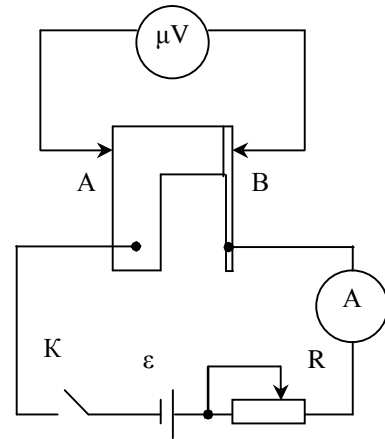


Рисунок 4 – Принципиальная схема измерения переходного электросопротивления образца (б): μV – микровольтметр; A – амперметр; K – ключ; ϵ – источник питания; R – подстроечное сопротивление

Экспериментальный П-образный образец можно заменить эквивалентной электрической схемой (рис. 5).

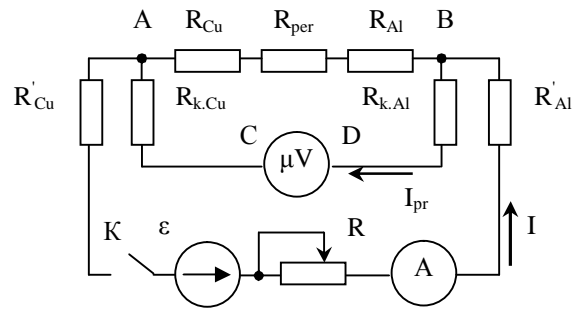


Рисунок 5 – Эквивалентная электрическая схема измерения переходного электросопротивления биметалла

Тогда величину электросопротивления медной и алюминиевой частей биметаллического образца можно рассчитать как:

$$R_{Cu} = r_{Cu} \frac{L_{Cu}}{F_{Cu-Al-per}}, \quad (2)$$

$$R_{Al} = r_{Al} \frac{L_{Al}}{F_{Cu-Al-per}}, \quad (3)$$

где ρ_{Cu} , ρ_{Al} – удельное электрическое сопротивление меди и алюминия соответственно; L_{Cu} , L_{Al} – длина образца до переходной зоны медной и алюминиевой части соответственно; $F_{Cu-Al-per}$ – площадь поперечного сечения переходной зоны.

Неизвестную величину электросопротивления переходной зоны можно определить при пропускании через цепь постоянного тока. При этом измеренная величина падения напряжения на сопротивлении R_{per} , отнесенная к величине силы тока, количественно отражает электросопротивление переходной зоны, которую согласно эквивалентной схеме можно определить выражением:

$$R_{\text{per}} = R_{\text{izm}} - R_{\text{Cu}} - R_{\text{Al}} = \frac{\Delta U - I_{\text{pr}}(R_{\text{k,Cu}} + R_{\text{k,Al}})}{I} - r_{\text{Cu}} \frac{L_{\text{Cu}}}{F_{\text{Cu-Al-per}}} - r_{\text{Al}} \frac{L_{\text{Al}}}{F_{\text{Cu-Al-per}}}, \quad (4)$$

где R_{izm} – измеренное электросопротивление биметаллического образца; R_{Cu} , R_{Al} – расчетное электросопротивление его медной и алюминиевой частей; $R_{\text{k,Cu}}$ и $R_{\text{k,Al}}$ – контактное электросопротивление перехода «игла (шуп)–металл».

Во всех экспериментах через образец пропускали постоянный ток 1А от стабилизированного источника питания. Превышение этой величины приводит к нагреву образца во время испытаний, что снижает точность измерений, а пропускание тока более 1А требует более точных измерительных приборов. При этом током, протекающим по цепи В–D–С–А (рис. 5), из-за его крайне малой величины ($I_{\text{pr}} \approx 1\text{--}5$ мкА) можно пренебречь (ошибка измерения составляет 10^{-6} А).

После включения цепи ключом К (рис. 3, 4) с помощью микровольтметра (класс точности 0,05), подключенного к специальному игольчатому контакту, обеспечивающему постоянное усилие прижатия игл, измеряли падение напряжения на отрезке А–В (рис. 3). Учитывая, что при такой конфигурации испытуемого образца на отрезке А–В линии тока некоторым образом могут искривляться, замеры падения напряжения производили в пяти различных точках (рис. 3), в каждой из которых измерения повторяли по 10 раз.

Для устранения систематической ошибки измерений, связанной с сопротивлением контакта «игла–металл» $R_{\text{k,Cu}}$ и $R_{\text{k,Al}}$, предварительно проводили измерения на «эталонных» монометаллических (медных и алюминиевых) образцах того же размера и в тех же условиях, что и на реальных биметаллических. При этом общее электросопротивление цепи рассчитывали как

$$R_{\text{izm}} = R_{\text{Cu}} + 2R_{\text{k,Cu}}, \quad (5)$$

$$R_{\text{izm}} = R_{\text{Al}} + 2R_{\text{k,Al}}, \quad (6)$$

откуда

$$R_{\text{k,Cu}} = 0,5(R_{\text{izm}} - R_{\text{Cu}}), \quad (7)$$

$$R_{\text{k,Al}} = 0,5(R_{\text{izm}} - R_{\text{Al}}). \quad (8)$$

Измерения показали, что электросопротивление контакта «игла–металл» для меди и алюминия соответственно равно $R_{\text{k,Cu}} = (2,33\text{--}2,51) \cdot 10^{-7}$ и $R_{\text{k,Al}} = (7,24\text{--}7,43) \cdot 10^{-7}$ Ом.

Так как точная толщина или длина переходной зоны L_{per} является трудноопределяемой и в большинстве случаев переменной величиной даже в пределах одного образца, точное определение удельного сопротивления переходной зоны ρ_{per} не представляется возможным. Показателем, численно характеризующим сопротивление переходной зоны медно-алюминиевой композиции в расчете на единицу

площади сварного шва, примем произведение ρL_{per} – «единичное переходное электросопротивление».

В результате проведенных опытов по измерению единичного переходного электросопротивления медно-алюминиевого биметалла с различным содержанием оплавленного металла в сварном шве установлено, что в соединении с практически «чистой» границей (относительное количество оплавок по длине не превышает 5 %) ρL_{per} составляет приблизительно 30...35 мкОм·мм².

ВЫВОДЫ. 1. Разработана технология изготовления медно-алюминиевого композита М1+АД0 толщиной 2+8 мм плакированием взрывом. Для этого сочетания материалов и их толщин экспериментально опробована методика подготовки под сварку соединяемых материалов и заряда взрывчатых веществ, на основании экспериментального и производственного опыта определены параметры взрывчатого вещества и режимы сварки.

2. Исследования механических и электрофизических свойств полученных композиций показали приемлемые с качественной и количественной точки зрения значения этих свойств, таких как угол изгиба, прочность на отрыв слоев, сопротивление биметалла срезу, переходное электрическое сопротивление. Результаты механических и электрофизических испытаний позволяют использовать разработанную технологию в промышленном масштабе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергосберегающие композиционные элементы токоподводящих узлов силовых электрических цепей / Е.А. Чугунов, В.И. Лысак, С.В. Кузьмин и др. // Энергетик. – 2001. – № 9. – С. 13–15.
2. Исследование свариваемости взрывом, структуры и свойств медно-алюминиевого биметалла / С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, А.П. Пеев // Изв. ВолгГТУ. Серия "Сварка взрывом и свойства сварных соединений". – Волгоград: ВолгГТУ, 2006. – Вып. 2, № 9. – С. 37–45.
3. Медно-алюминиевые композиционные материалы, полученные сваркой взрывом / И.С. Лось, Д.Б. Крюков, А.В. Хорин // Известия ВолгГТУ. Серия "Сварка взрывом и свойства сварных соединений". – Волгоград, 2010. – № 5. – С. 88–92.
4. Биметаллы / Л.Н. Дмитров, Е.В. Кузнецов, А.Г. Кобелев и др. – Пермь: Пермское книжное изд., 1991. – 415 с.
5. Технология слоистых металлов: Учебн. пособие / А.Г. Кобелев, И.Н. Потапов, Е.В. Кузнецов. – М.: Металлургия, 1991. – 248 с.
6. Соннов А.П. Технология сварки и резки металлов взрывом. – Волгоград: Изд-во ВПИ, 1984. – 70 с.
7. Казак Н.Н. Свойства и области применения сварных соединений, полученных сваркой взрывом: учеб. пособие. – Волгоград: Изд-во ВПИ, 1984. – 77 с.
8. Новая методика исследования электрофизических свойств сваренных взрывом композитов / А.П. Пеев, С.В. Поляков, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – № 3. – С. 60–63.

ON TESTING OF COPPER–ALUMINIUM COMPOSITIONS OBTAINED BY EXPLOSIVE WELDING**V. Zagoryanskyi, V. Dragobetskyi, V. Kostin**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

B. Bugaychuk

ABM Amper, LTD

vul. Krasina, 6, Kremenchuk, 39605, Ukraine.

The resource-saving technology of fabrication of the layered copper–aluminium composition by explosive welding is worked out for ABM Amper, LTD, which is a producer of electrical engineering equipment. The basis is a AD0 aluminium sheet of 8 mm gage, the plating layer is a M1 copper sheet of 2 mm gage. An explosive is a mixture of 6ZhB ammonite and granular ammoniac nitrate in ratio 1:1. The tests of mechanical and electro-physical properties of the compositions obtained demonstrate the acceptable significance of the properties (angle of curvature, tear strength, resistance of bimetal to the shear, transitional electric resistance) from the qualitative and quantitative point of view. The results of tests allow to use the developed technology in the industrial scale.

Key words: copper–aluminium composition, explosive welding, mechanical and electro-physical properties.

REFERENCES

1. Energy-saving composition elements of conduct knots of power electric circuits / E.A. Chugunov, V.I. Lysak, S.V. Kuz'min and other // *Energetik*. – 2001. – № 9. – PP. 13–15. [in Russian]
2. Research of welding an explosion, structure and properties of copper–aluminium bimetal / S.V. Kuz'min, V.I. Lysak, A.P. Peev // *Izv. VOLGGTU. Seriya "Welding and properties of the weld-fabricated connections an explosion"*. – Volgograd: VOLGGTU, 2006. – Iss. 2, № 9. – PP. 37–45. [in Russian]
3. Copper–aluminium composition materials, got welding an explosion / I.S. Los', D.B. Krukov, A.V. Khorin of // *Izv. VOLGGTU. Seriya "Welding and properties of the weld-fabricated connections an explosion"*. – Volgograd: VOLGGTU, 2010. – № 5. – PP. 88–92. [in Russian]
4. *Bimetals* / L.N. Dmitrov, E.V. Kuznetsov, A.G. Kobelev and other. – Perm': Perm' book publ., 1991. – 415 p. [in Russian]
5. *Technology of the layered metals: Tutorial*. / A.G. Kobelev, I.N. Potapov, E.V. Kuznetsov. – M.: Metallurgy, 1991. – 248 p. [in Russian]
6. Sonnov A.P. *Technology of welding and cutting with of metals an explosion*. – Volgograd: Izd-vo VPI, 1984. – 70 p. [in Russian]
7. Kazak N.N. *Properties and application of the weld-fabricated connections, got welding an explosion domains: Tutorial*. – Volgograd: Izd-vo VPI, 1984. – 77 p. [in Russian]
8. New method of research of electro-physical properties of the compositions, cooked by an explosion / A.P. Peev, P.V. Polyakov, P.V. Kuz'min, V.I. Lysak // *Physics and chemistry of treatment of materials*. – 2003. – № 3. – PP. 60–63. [in Russian]

Стаття надійшла 04.09.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Саленком О.Ф.