



УДК 621.791.76:621.7.044.2

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОАКСИАЛЬНЫХ МЕДНО-АЛЮМИНИЕВЫХ ПРУТКОВ С ПОМОЩЬЮ СВАРКИ ВЗРЫВОМ И ПРОТЯЖКИ

А.Г. БРЫЗГАЛИН<sup>1</sup>, Л.Д. ДОБРУШИН<sup>1</sup>, П.С. ШЛЕНСКИЙ<sup>1</sup>, И.Г. ЛАВРЕНКО<sup>2</sup>, И.М. РОМАШКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup> ГП «Антонов». 03082, г. Киев, ул. Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

Замена меди при производстве токоведущих шин на алюминиевые, плакированные тонким слоем меди, позволяет снизить металлоемкость изделий при сохранении высокой электропроводности. Предложена технология изготовления коаксиальных медно-алюминиевых токоведущих прутков с помощью сварки взрывом и протяжки. Экспериментально подобраны режимы термообработки прутков после протяжки, обеспечивающие требуемые механические свойства при минимальном количестве образующихся при этом интерметаллидов. Описана методика расчета размеров исходных заготовок, позволяющих получить требуемые геометрические параметры изделия. Показана возможность применения обжатия взрывом заготовок вместо сварки взрывом. Библиогр. 5, табл. 2, рис. 7.

*Ключевые слова:* медно-алюминиевые прутки, электропроводность, сварка взрывом, протяжка, биметалл

Токоведущие шины электроаппаратуры ответственного назначения выполняются из меди, имеющей высокую электропроводность и, в то же время, высокую плотность [1]. Замена сплошных медных шин на алюминиевые, плакированные тонким слоем меди, обеспечивает значительное снижение массы изделий при сохранении их электропроводности. Однако существующие технологии, которые позволяли бы получать биметаллические заготовки, допускающие последующие прокатку и изгиб под большими углами без нарушений механической сплошности и надежного электрического контакта, предполагают использование весьма дорогостоящего импортного оборудования. Для получения биметалла медь-алюминий в Украине и за рубежом широко применяется сварка взрывом. Этот материал находит применение в энергоемких отраслях промышленности в качестве токоподводящих и переходных элементов благодаря близкому к нулю переходному сопротивлению соединения. Несмотря на то, что оба материала отличаются высокими пластическими свойствами, что необходимо для получения качественного сварного соединения, обеспечение равнопрочности и бездефектности при сварке взрывом проблематично по ряду причин, связанных с существенным различием физико-механических свойств металлов, а также крайне неблагоприятным с позиций свариваемости типом металлургического взаимодействия с образованием ряда интерметаллидов типа  $Al_2Cu$ ,  $AlCu$ ,  $AlCu_2$ ,  $Al_2Cu_3$  [2].

В ИЭС им. Е.О. Патона разработана технология изготовления биметаллических медно-алюминиевых прутков с помощью соединения взрывом медной оболочки с алюминиевым прутком и

последующей протяжки. По техническому заданию (ТЗ) необходимо было изготовить биметаллические прутки диаметром 8 и 9 мм с толщиной медного покрытия не менее 0,3 мм и требуемым уровнем механических свойств: временным сопротивлением разрыву прутка не менее 90 МПа и относительным удлинением не менее 25 %.

Биметаллическую заготовку изготавливали путем приварки медной трубки с наружным диаметром 28 мм и толщиной стенки 1 мм к алюминиевому прутку диаметром 24 мм. Приведенные геометрические параметры выбирали исходя из допущения о сохранности массы и объема применяемых материалов при протяжке, условий обеспечения требуемых конечных размеров прутка и оптимальных режимов сварки взрывом. Алюминиевый пруток 2 (рис. 1) протачивали для придания ему формы, обеспечивающей установку сварочного зазора и формовку хвостовика для последующей протяжки. Сборку под сварку взрывом

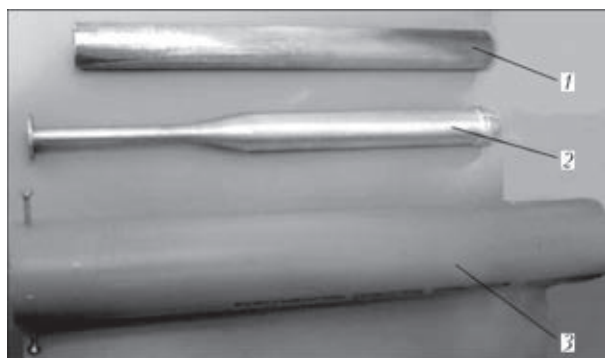


Рис. 1. Основные составляющие элементы для сварки взрывом биметаллического прутка: 1 — медная трубка; 2 — алюминиевый пруток; 3 — полиэтиленовая труба, служащая контейнером для взрывчатого вещества



Рис. 2. Заготовка для протяжки биметаллического прутка, полученная сваркой взрывом

осуществляли путем размещения алюминиевого прутка внутри медной трубки 1 со сварочным зазором 1 мм. Медную трубку в свою очередь коаксиально вставляли в полиэтиленовую трубу с внутренним диаметром 47 мм, которая служила контейнером для взрывчатого вещества 3 (рис. 1).

Толщина заряда, представляющего собой смесь аммонита 6ЖВ с аммиачной селитрой, составляла 9,5 мм. Выбранный режим сварки обеспечивал получение качественных заготовок для последующей протяжки (рис. 2).

Граница соединения не имела характерного для сварки взрывом волнообразования, что свидетельствует о выполнении сварки на нижней границе допустимых режимов, т. е. с минимальным энергозложением [3]. Это позволило свести к минимуму (порядка 10 % по длине соединения) количество образующихся при сварке интерметаллидов (рис. 3, а).

Протяжка биметаллических прутков осуществлялась на оборудовании НИЦ «Материалообработка взрывом» ИЭС им. Е.О. Патона. Установлено, что оптимальное уменьшение диаметра биметаллической заготовки за один проход составляет 0,5 мм. При этом не требуется проведение термообработки заготовок на всех этапах операции протяжки.

Исследование механических свойств биметаллических прутков после протяжки показало, что они не удовлетворяют требованиям, предъявляемым заказчиком. В связи с этим прутки подвергались термообработке по режимам, приведенным в табл. 1. На рис. 3 приведены фотографии микроструктуры соединения в исходном после сварки и протяжки состоянии и после термообработки по некоторым из указанных режимов. В исходном состоянии практически нет интерметаллидов, после термообработки по режиму № 2 (табл. 1, строка 2) появились интерметаллиды, термообработка по

режиму № 5 (табл. 1, строка 5) привела к увеличению их числа и размеров.

Механические свойства биметаллических прутков диаметром 9 мм, полученных сваркой взрывом и протяжкой, а также биметаллических прутков, полученных на установке фирмы «Copperweld» (США), диаметром 8 мм и требования ТЗ, приведены в табл. 1.

Требованиям ТЗ удовлетворяют биметаллические прутки, подвергнутые термообработке при температуре 300 °С в течение 40 мин. Такие изделия проявили достаточно высокую способность к деформированию как при стандартных испытаниях на загиб (рис. 4) [5], так и при формообразовании контактных площадок токоведущих шин.

При испытаниях на загиб нетермообработанные прутки выдерживали три загиба на 180° и имели излом с отслоением медного слоя от алюминиевой основы, термообработанные прутки по режиму № 4 выдерживали 24 загиба, излом не имел расслоений.

Измерение удельного электрического сопротивления  $R$  отожженного биметаллического прутка (режим № 4) постоянному току в пересчете на температуру 20°С составило  $0,027 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, что удовлетворяет требованиям ТЗ.

Получение качественной сварки взрывом заготовок требует тщательного соблюдения параметров сварки, что предопределяет высокую трудоемкость подготовительных операций. В связи с этим особый интерес представляет возможность

Т а б л и ц а 1. Механические свойства биметаллических прутков, полученных сваркой взрывом и протяжкой

Номер режима	Состояние образца	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
1	Исходное	121	150	12
2	ТО 180 °С, 30 мин	143	150	13
3	ТО 250 °С, 60 мин	171	187	18
4	ТО 300 °С, 40 мин	127	149	28
5	ТО 350 °С, 60 мин	44	113	57
6	Биметаллический пруток фирмы «Copperweld»	186	-	11

Примечание. Требования ТЗ:  $\sigma_r \geq 90$  МПа и  $\delta \geq 25$  %.

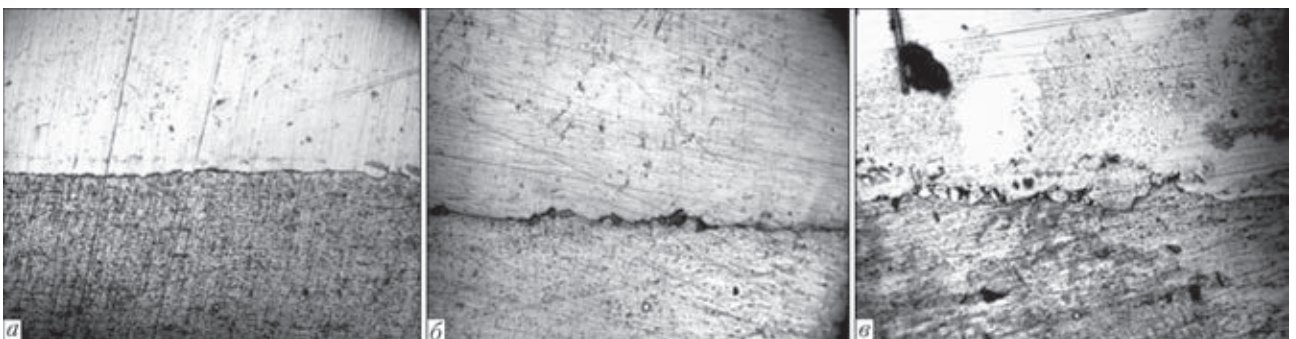


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 200$ ) соединения медь–алюминий. а — в исходном после сварки и протяжки состоянии; б — после термообработки 180 °С, выдержка 30 мин; в — после термообработки 350 °С, выдержка 60 мин

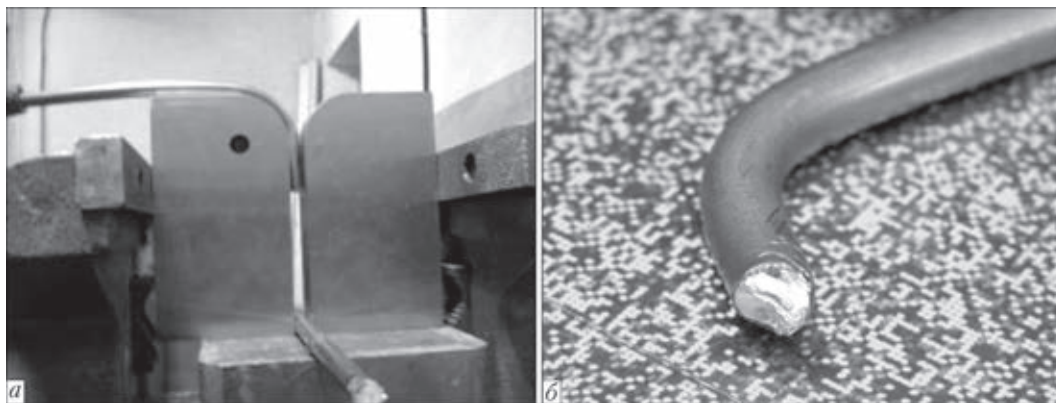


Рис. 4. Общий вид способа испытаний на загиб (а) и вид излома прутка (б)

Таблица 2. Механические свойства биметаллических прутков, полученных обжатием взрывом и протяжкой

Номер режима	Вид образца	$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
1	Исходный	144	150	12
2	ТО 180 °С, 30 мин	143	150	13
3	ТО 350 °С, 60 мин	44	113	57

получения коаксиальных прутков по схеме «обжатие взрывом+протяжка».

Соединение биметаллической заготовки обжатием без обязательного образования сварного соединения имеет ряд преимуществ:

- менее жесткие требования к режимам обработки взрывом по сравнению со сваркой взрывом и, соответственно, увеличение производительности и снижение себестоимости;

- уменьшение массы используемого заряда взрывчатого вещества;

- возможность использования взрывчатых веществ с любой скоростью детонации.

При этом взрывное обжатие обеспечивает кумулятивную очистку соединяемых поверхностей, что дает основания ожидать возможность диффузионной сварки, процесс которой ускоряется при протяжке и термообработке заготовок.

Для изготовления коаксиальных биметаллических прутков по схеме «обжатие+протяжка» были использованы заготовки:

- алюминиевый пруток марки АД1 диаметром 15 мм длиной 300 мм;

- медная трубка (М2) наружным диаметром 20 мм, толщина стенки 1 мм, длина 300 мм.

После обжатия взрывом получена биметаллическая заготовка с переменным диаметром 17,5...18,0 мм. Различие в диаметре по длине заготовки объясняется наличием воздушных пузырей между слоем меди и алюминиевым стержнем. Объем пузырей по отношению к объему исходных заготовок составил 10 % (объем пузырей рассчитывался как разность объема исходных заготовок и биметаллической заготовки после обжатия взрывом).

Биметаллический пруток получили протяжкой с шагом уменьшения диаметра 0,5 мм без проме-

жуточной термообработки. Длина полученного прутка, с учетом технологических потерь на изготовление хвостовиков для зажима заготовки при протяжке, составила 930 мм. Длина прутка с качественным покрытием после удаления начала и конца прутка с бракованным покрытием составила 845 мм, внешним осмотром установлено отсутствие воздушных пузырей и поверхностных дефектов. Диаметр полученного после протяжки прутка составлял 8,91...8,94 мм, среднее значение (по 10 измерениям) 8,92 мм. Толщина медного слоя 0,535...0,600 мм, среднее значение — 0,587 мм.

Механические свойства биметаллических образцов определяли непосредственно после протяжки, а также после отжига по режимам: 1: 180 °С в течение 0,5 ч; 2: 350°С, 1 ч. Данные испытаний на растяжение приведены в табл. 2.

Исследование микроструктуры провели на шлифах в исходном состоянии и после термообработки по режимам 1, 2 (рис. 5).

Для оценки влияния термообработки на состояние интерметаллидов выбрали участок шлифа в исходном после обжатия и протяжки состоянии (рис. 5, а). Этот же участок шлифа с характерными интерметаллидными включениями представлен на рис. 5, б, в после термообработки вначале по режиму 1, а затем по режиму 2. Режим 1 не привел к образованию интерметаллидной прослойки и росту имеющихся интерметаллидов. При отпуске по режиму 2 образовалась интерметаллидная прослойка толщиной около 10 мкм.

Линия соединения медь–алюминий не имеет расслоений и других дефектов несплошности. Наблюдаются участки с образованием сварки взрывом с характерным волнообразованием, деформированным после протяжки. На некоторых безволновых участках вдоль линии соединения в зоне сварки взрывом заметны цепочки включений алюминия в медную основу. По всей видимости, в этих местах волны от сварки взрывом были разрушены при протяжке, что и привело к внедрению частиц алюминия в медную основу (рис. 6).



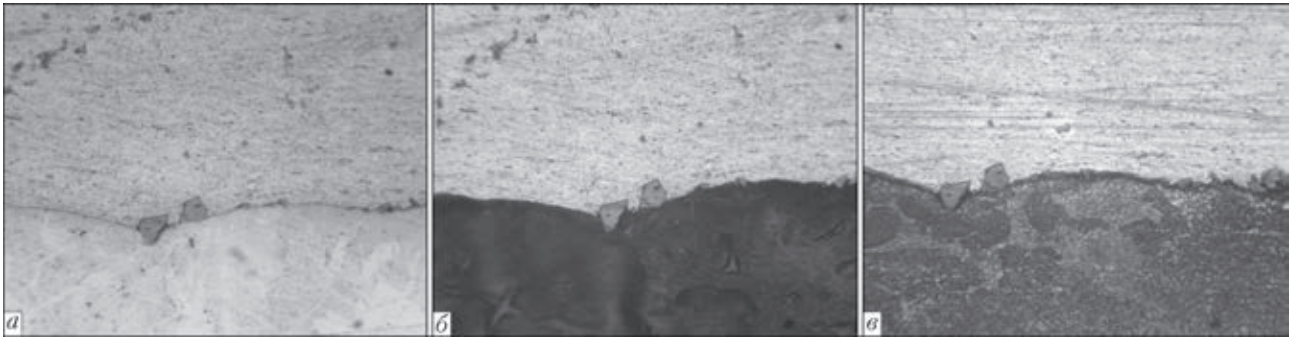


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 200$ ) соединения: *a* — в исходном состоянии после обжатия и протяжки; *б* — термообработка 180 °С, 30 мин; *в* — термообработка 350 °С, 60 мин

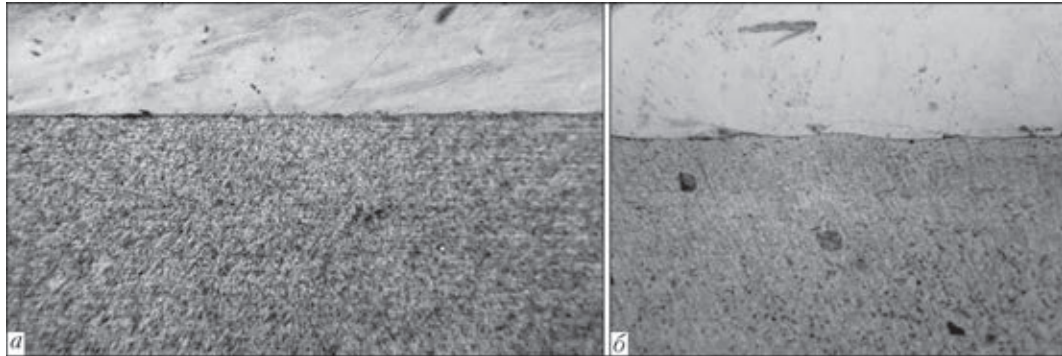


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 200$ ) соединения медь–алюминий после обжатия взрывом и протяжки: *a* — безволновое соединение; *б* — внедрение частиц алюминия в медную основу

Выявлено также образование на некоторых участках интерметаллидов в виде цепочки зерен вдоль линии соединения. Общая протяженность участков с интерметаллидами составляет порядка 20...25 %. Обеспечение требуемых механических и электрических параметров прутка требует подбора оптимальных режимов обжатия взрывом (в данном случае снижение энергетики заряда и уменьшение зазора) и термообработки.

Для выбора оптимального типоразмера исходных заготовок алюминиевого прутка и медной трубки (рис. 7) предложен метод расчетной оценки их геометрических параметров. При этом предполагается, что сварочный зазор между медью и

алюминием равен толщине стенки медной трубки (что соответствует практическим режимам сварки) и пренебрегаются расчетные величины второго порядка малости.

Заказчиком заданы диаметр прутка  $d$ , который должен быть изготовлен, и допустимая толщина слоя меди в нем  $h_{и}$ . При изготовлении заготовок ориентируются на приобретаемую медную трубу, имеющую стандартный типоразмер, определяемый ее наружным диаметром  $D_{Cu}$  и толщиной стенки  $h$ . Для повышения производительности  $D_{Cu}$  должен быть как можно большим и ограничен возможностями волочильного оборудования. Исходя из этих соображений выбирается стандартный диаметр медной трубы и определяется расчетная толщина стенки по выражению:

$$h_p = h_{и} D_{Cu} / d.$$

Значение  $h$  определяется округлением  $h_p$  до наибольшего стандартного. Толщина медного слоя в изделии оценивается по выражению:

$$h_{и} = h d / D_{Cu},$$

и будет заведомо больше определенного заказчиком. Варьируя стандартным диаметром медной трубы, можно подобрать наиболее оптимальный ее типоразмер с учетом требований к величине  $h_{и}$  и производительности процесса изготовления прутка.

Диаметр алюминиевого прутка  $D_{Al}$  рассчитывается следующим образом:

$$D_{Al} = D_{Cu} - 2h - 2s,$$

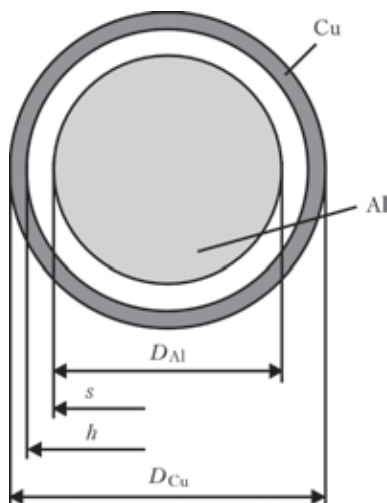


Рис. 7. Параметры коаксиальной заготовки под сварку взрывом



где  $s$  — сварочный зазор.

Определяется коэффициент удлинения при протяжке  $K$ :

$$K = (D_{Cu}^2 - 4D_{Al}h) / d^2.$$

Длина цилиндрической части заготовок  $L_3$  определяется, исходя из заданной заказчиком минимальной длины прутка  $L_{пр}$ :

$$L_3 \geq L_{пр} / K + L_x,$$

где  $L_x$  — длина заготовки, учитывающая изготовление промежуточных хвостовиков и определяется технологией протяжки.

По результатам НИР изготовлена партия медно-алюминиевых прутков диаметром 8 и 9 мм, позволившая отработать технологию изготовления токоведущих шин и провести их испытания.

### Выводы

1. Разработана технология изготовления медно-алюминиевых прутков для электротехниче-

ских целей с помощью сварки взрывом и протяжки, обеспечивающая их высокие пластические и электропроводные свойства.

2. Показана принципиальная возможность изготовления прутка с помощью обжатия взрывом и протяжки.

3. Разработаны технические условия на изготовление и поставку медно-алюминиевых прутков диаметром 8...10 мм наименованием «Пруток алюмомедный электротехнический марки ПАМ».

1. *ГОСТ 434–78*. Проволока прямоугольного сечения и шины медные для электротехнических целей. Технические условия.
2. *Кудинов В.М., Коротеев А.Я.* Сварка взрывом в металлургии. – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.
3. *Лысак В.И., Кузьмин С.В.* Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 2005. – 544 с.
4. *ГОСТ 1579–93*. Проволока. Испытания на перегиб.
5. *ГОСТ 7229–76*. Кабели, провода и шнуры. Метод определения электрического сопротивления токопроводящих жил и проводников.

Поступила в редакцию 26.01.2015

## НОВЫЕ КНИГИ

**Fronius. CMT Welding Technology.** ISBN 978-3-945023-36-5. DVS Media GmbH, Duesseldorf, 2014, 96 с. (Eng.).

В книге рассматривается новая технология дуговой сварки с возвратным движением сварочной проволоки, которая является расширением процесса сварки с короткой дугой.

Благодаря пониженному вводу тепла этот процесс получил название «Cold Metal Transfer» (CMT) — технология холодного переноса металла.

Представлены различные варианты процесса и новые области использования применительно к процессам сварки, пайки, наплавки различных материалов в сравнении с традиционными технологиями.

Книгу можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».

**Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах:** Сб. докл. Седьмой межд. конф. / Под ред. проф. И.В. Кривцуна. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2014. – 132 с. (электронное издание <http://patonpublishinghouse.com.proceedings/mmw2014.pdf>).

В сборнике представлены доклады Седьмой международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», в которых отражены достижения за последние годы в области математического моделирования физических явлений, протекающих при сварке, наплавке и других родственных процессах. Авторами докладов являются известные ученые и специалисты.

Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов.

