



УДК 621.791.763.1

## СВАРКА СОПРОТИВЛЕНИЕМ СПЛАВА СИСТЕМЫ МЕДЬ-АЛЮМИНИЙ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Б.Е. ПАТОН<sup>1</sup>, Д.М. КАЛЕКО<sup>1</sup>, С.Н. КЕДРОВСКИЙ<sup>2</sup>, Ю.Н. КОВАЛЬ<sup>2</sup>, И.В. КРИВЦУН<sup>1</sup>, В.Н. СЛЕПЧЕНКО<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Ин-т металлофизики им. Г.В.Курдюмова НАН Украины, 03680, Киев-142, бульв. Акад. Вернадского, 36.  
E-mail: metall@imp.kiev.ua

Перспективной заменой дорогостоящим сплавам с эффектом памяти формы (СЭПФ) системы Ti–Ni в крепежных изделиях, активаторах термоавтоматики и сверхупругих элементах приборов служат СЭПФ на основе системы Cu–Al. Поэтому приобрела актуальность проблема соединения последних в различных сочетаниях с подобным материалом и другими конструкционными металлами. Основным требованием к таким соединениям, кроме прочности, является сохранение функциональных характеристик, а именно, температурного диапазона восстановления формы при термоупругом мартенситном превращении. Исследовалась свариваемость сплава системы Cu–Al в виде фольги толщиной 0,05 мм, ленты толщиной 0,3 мм и проволоки диаметром 1,0 мм методами точечной и стыковой конденсаторной сварки и показано, что при импульсном сварочном нагреве в соединениях с прочностью на разрыв, соответствующей прочности основного металла, сохраняются функциональные характеристики вблизи места сварки. Металлографические исследования показали рекристаллизацию исходного крупнокристаллического металла в зоне сварочного нагрева с образованием мелкокристаллической структуры как в соединениях в твердом состоянии, так и вокруг литого ядра при точечной сварке ленты толщиной 0,3 мм. Получены удовлетворительные стыковые соединения СЭПФ и медной проволоки. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 10.

*Ключевые слова:* сплавы с эффектом памяти формы, медноалюминиевые сплавы, контактная точечная сварка, контактная стыковая сварка, термоупругое мартенситное превращение.

Сплавы, характеризующиеся эффектом термоупругости, так называемые сплавы с эффектом памяти формы, находят все более широкое применение в изделиях медицинской техники (импланты, протезы, инструмент), в составе активаторов термодетекторов и в монтажных устройствах для герметичных механических соединений, например, трубопроводов.

Наибольшее применение сегодня находят сплавы на основе интерметаллического соединения NiTi почти эквивалентного состава (нитинол) с добавками легирующих элементов, расширяющих их функциональные возможности. Главным достоинством нитинола является его биоинертность и атоксичность, что критически важно при изготовлении изделий медицинской техники. В иных случаях применения используют присущую нитинолу сверхупругость, которая проявляется при температурах выше конца аустенитного превращения [1–3].

Нитинол не единственный известный сплав с эффектом памяти формы. Явление термоупругости наблюдается еще в ряде сплавов, из которых наиболее технологичны сплавы на основе Cu–Al. К достоинствам таких сплавов по сравнению с нитинолом относятся пониженная стоимость исходного материала и простота технологии их выплавки, что является важным в связи с расширением

применения СЭПФ в технике, а также более высокий, чем у нитинола, температурный интервал мартенситных превращений [3].

Свариваемость нитинола как в твердом, так и в расплавленном состоянии изучалась рядом исследователей. Анализ этих работ [4] показал, что наиболее эффективны методы соединения с импульсным нагревом, когда в зоне сварки не успевают пройти реакции изменения стехиометрического состава NiTi с выделением фаз с иной химической формулой (Ti<sub>2</sub>Ni и TiNi<sub>3</sub>). К таким способам относятся точечная и ударная конденсаторная сварка деталей плоского и круглого сечений с характерным размером до 1 мм.

Учитывая перспективность применения медно-алюминиевых сплавов в технике, актуальным является поиск соответствующих методов сварки деталей малого сечения из этих сплавов.

Исследования проводили с образцами из сплава системы Cu–Al, имеющими механические характеристики и температуру потери упругости более высокие, чем у двойного сплава [3].

Химический состав исследуемого сплава в исходном состоянии, мас. %: 0,162 Ni; 0,85 Co; 0,22 Fe; 3,79 Mn; 11,1 Al; 83,9 Cu.

Сварку сопротивлением сплава системы Cu–Al исследовали на образцах из фольги толщиной 50 мкм, полосы толщиной 300 мкм и проволоки

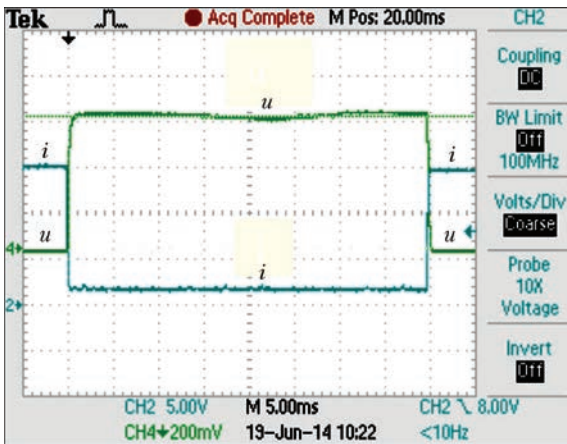


Рис. 1. Осциллограмма разрядного тока суперконденсаторов и электрического напряжения на образцах, соединяемых при стыковой сварке меди диаметром 0,8 мм и СЭПФ на основе Cu–Al диаметром 1,0 мм

диаметром 1,0 мм. Качество соединений оценивали по механической прочности, а также сравнением температур фазового перехода исходного металла и сварного соединения.

Нахлесточные соединения плоских образцов сваривали на конденсаторной машине ТКМ-17 [5]. Особое внимание, учитывая высокую тепло- и электропроводность испытуемого материала, уделялось выбору материала электрода. Эксперименты показали, что при точечной сварке фольги лучший результат получается с электродами, имеющими молибденовую вставку, ограничивающую теплоотвод от свариваемого соединения, а при сварке полосы можно использовать обычные [5] электроды из известного сплава МЗЦ.

Поверхность деталей не требовала специальной подготовки, если на ней не было окалины после прокатки.

Оптимальный режим сварки (таблица) определяли по результатам механических испытаний на растяжение образцов, изготовленных из фольги, на разрывной машине РМУ-005-01, а из полосы — на машине Р-05.

Оптимальные режимы точечной конденсаторной сварки фольги и ленты из СЭПФ на основе Cu–Al (емкость конденсаторов 200 мкФ, количество витков дросселя 140)

Образец (толщина, мм)	Напряжение зарядки конденсаторов, В	Коэффициент трансформации	Усилие сжатия, даН
Фольга (0,05)	600	200	15
Полоса (0,30)	750	150	30

Образцы стыковой контактной сварки проволоки получили на лабораторной установке с использованием разрядного тока суперконденсаторов, обеспечивающих постоянство электрических характеристик за время сварки. Как показывает осциллограмма (рис. 1), при разряде суперконденсаторов емкостью 50 Ф в течение 40 мс значение сварочного тока практически не меняется. Это делает процесс сварки разрядом суперконденсаторов подобным сварке на постоянном токе. При этом нет необходимости сглаживать искажения тока, связанные с его выпрямлением.

Переменными параметрами режима были напряжение зарядки конденсаторов (7...30 В), продолжительность разряда (2 ... 10 мс), усилия сжатия (30 ... 50 Н). Контроль значений тока и времени нагрева проводили с помощью осциллографа TDS 2004. Качество соединения определяли изгибом сварного образца (однородных соединений) и растяжением (в том числе и соединений с медной проволокой) на машине РМУ-0,05-01. Качественными считались образцы, которые при изгибе разрушались на расстоянии не менее 2...3 мм от плоскости стыка.

Микроструктуру сварных соединений исследовали на микроскопе AXIOVERT 40 MAT.

Контроль характеристических температур мартенситного превращения образцов сложного легированного сплава Cu–Al проводили измерением температурной зависимости электросопротивления.

При испытаниях прочности на растяжение образцов как из фольги, так и полосы, выполненных точечной сваркой, соединение разрушается с вырывом материала (рис. 2). Вырыв из полосы

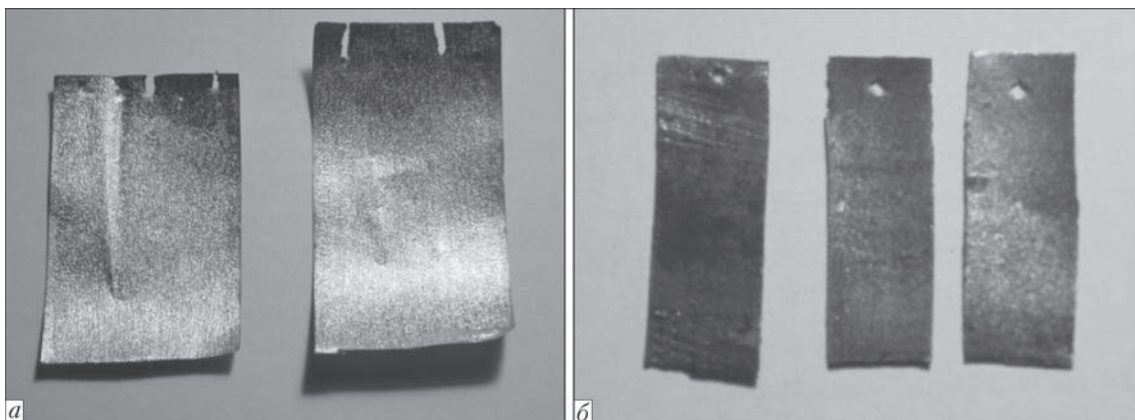


Рис. 2. Образцы, выполненные точечной конденсаторной сваркой после испытаний на разрыв: а — фольга толщиной 0,05 мм; б — полоса толщиной 0,3 мм

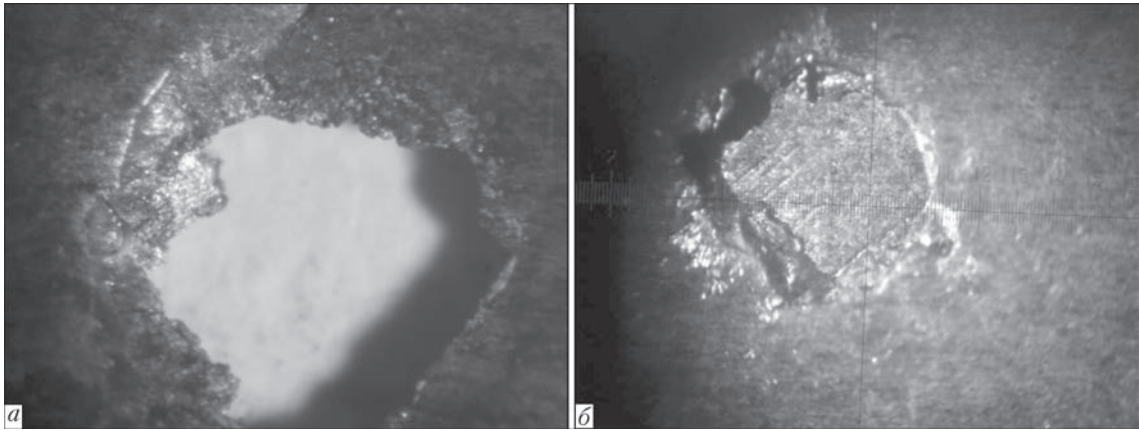


Рис. 3. Форма разрушения точечного соединения полосы толщиной 0,3 мм после нагрузки растяжением

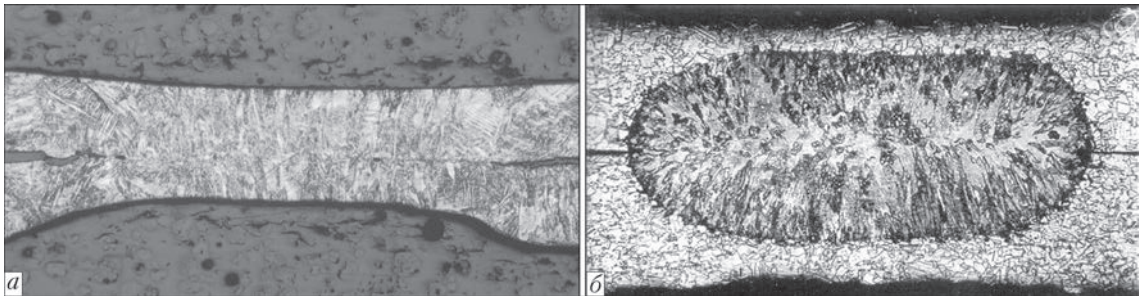


Рис. 4. Микроструктура точечного соединения фольги толщиной 0,05 мм (а,  $\times 300$ ) и полосы толщиной 0,3 мм (б,  $\times 100$ )

(рис. 3) не имеет форму правильного круга, что соответствовало бы контактной поверхности электрода, но вытянут в направлении приложения нагрузки, а вырванная часть соединения коническая.

Для повышения точности измерений эксперименты на фольге шириной 25 мм проводили с различным количеством точек в соединении (от двух до пяти точек в один ряд). Средняя прочность одной точки в таких соединениях составляла 0,46 даН. Усилие разрушения точечного соединения полосы составило  $80 (\pm 5)$  даН.

Металлографический анализ структуры образцов точечной сварки материала различной толщины (50 и 300 мкм) показал существенную разницу в типе образования соединения. Если при точечной сварке фольги, учитывая большую удельную нагрузку при сварке, соединение произошло в

твердом состоянии (рис. 4, а), то в соединении полосы образовывалось литое ядро (рис. 4, б).

Из сравнения структуры центральной зоны соединения и его периферии (рис. 5) видно, что металл фольги, используемой в исследовании, имел исходную крупнозернистую структуру, которая создавалась в результате отжига в процессе протяжки при изготовлении. Однако при точечной сварке в твердом состоянии прошла перекристаллизация металла в зоне нагрева и образование столбчатых кристаллитов в направлении теплоотвода.

Благодаря импульсному режиму нагрева при сварке разрядом конденсаторов, зона соединения имеет небольшую длину и структурные изменения, обнаруженные при исследовании, не влияют на функциональные свойства сплава с памятью формы.

В образцах толщиной 0,05 мм, наиболее чувствительных к нагреванию, была исследована

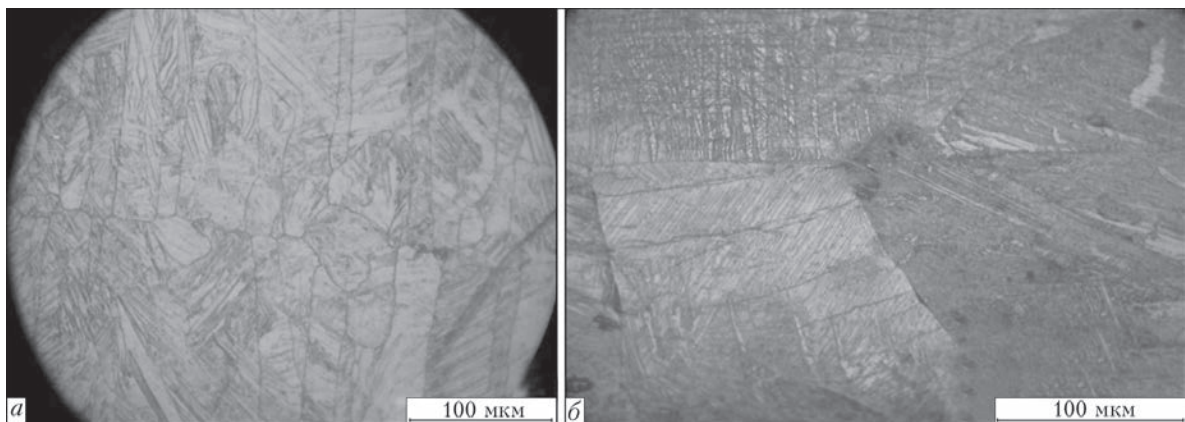


Рис. 5. Микроструктура зоны точечной сварки фольги: а — центральная часть; б — основной металл

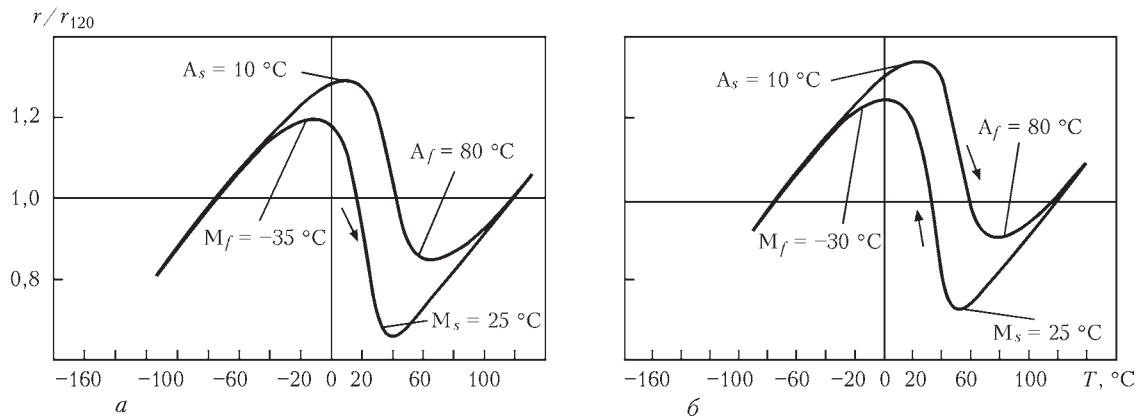


Рис. 6. Зависимость электросопротивления образцов от температуры: *a* — вне зоны термического воздействия; *б* — вблизи зоны термического воздействия сварки;  $r_{120}$  — сопротивление при 120 °С

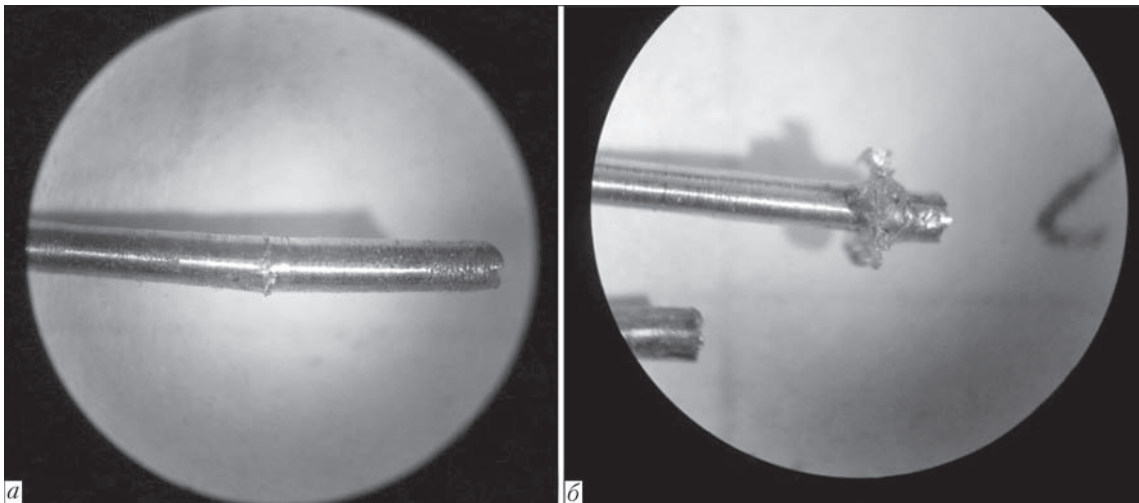


Рис. 7. Внешний вид стыковых соединений проволоки диаметром 1,0 мм: *a* — после сварки (1250 А, 4,7 мс); *б* — после испытания на изгиб (610 А, 100 мс)

зависимость электросопротивления от температуры в состоянии перед сваркой и после нее. Установлено, что в металле, который не подвергался термическому воздействию, изменение параметров мартенситного превращения не наблюдается (рис. 6, *a*). Вблизи зоны термического влияния (на расстоянии 3...5 мм) наблюдается некоторое повышение температуры конца мартенситного превращения

(рис. 6, *б*). Исследовать зону сварного шва на наличие и параметры мартенситного превращения не представляется возможным ввиду ее малого размера.

Внешний вид стыковых соединений проволоки диаметром 1,0 мм из сплава системы Cu–Al, сваренных на разных режимах, показан на рис. 7.

Металлографические исследования показали (рис. 8), что при стыковой сварке исследуемого сплава соединение происходит в твердом состоянии со случайным формированием общих зерен. Характерной особенностью микроструктуры вблизи линии раздела является наличие черточек, которые невозможно убрать шлифовкой. В отличие от точечной сварки (см. рис. 5), при сварке в твердом состоянии исходная структура металла не изменяется. Теплоотвод в цанговые стальные зажимы при стыковой сварке значительно меньше, чем в медные электроды точечной машины.

Следует отметить, что металлографические исследования стыковых соединений проводили на образцах, выдержавших изгиб с изломом вне стыка.

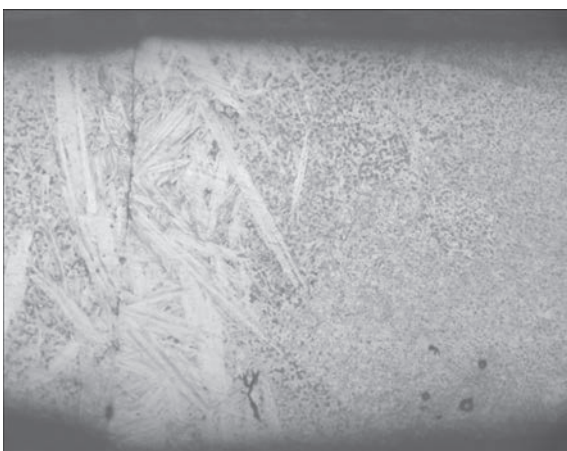


Рис. 8. Микроструктура ( $\times 100$ ) соединения двух проволок диаметром 1,0 мм из сплава Cu–Al, полученного стыковой конденсаторной сваркой

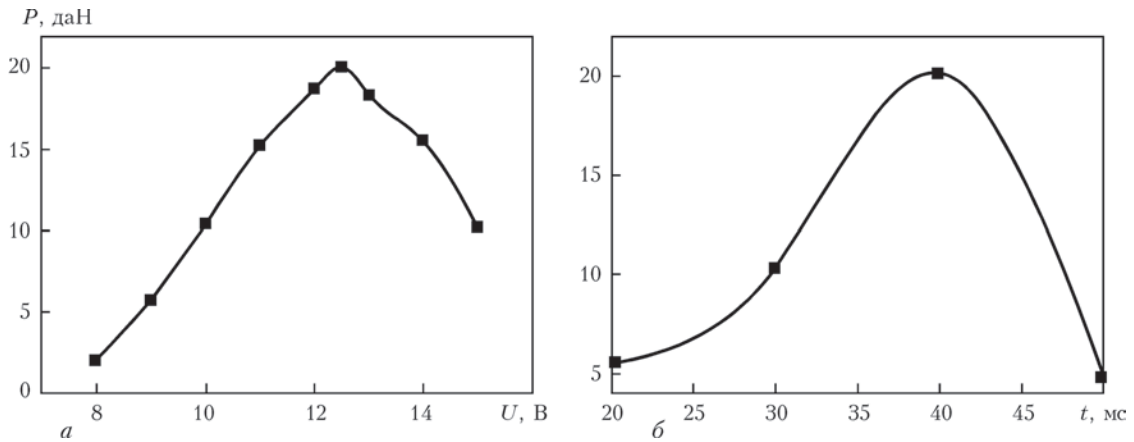


Рис. 9. Зависимость прочности стыковых соединений медной проволоки с проволокой из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al от напряжения заряда суперконденсаторов (а,  $t = 40$  мс) и времени включения сварочного тока (б,  $U = 12,5$  В)

Резистометрия показала, что, как и при исследовании образцов точечных соединений ленты и фольги, в периферийной зоне сварного стыкового соединения изменение температуры мартенситного превращения не наблюдается.

Практическое значение имеют соединения функционального материала с конструкционным металлом, особенно с высокоэлектропроводными медью и алюминием.

Исследовали стыковые соединения сложнолегированного сплава на основе Cu–Al (проволока диаметром 1,0 мм) с медной проволокой (диаметр 0,8 мм). Максимальная прочность соединения, определенная испытанием на растяжение, получена при напряжении заряда суперконденсаторов 12,5 В, сварочном токе 1152 А (см. рис. 1), продолжительности разряда 40 мс, длине свободного конца медной проволоки 2 мм, а проволоки из СЭПФ на основе Cu–Al — 3 мм и усилии осадки 30 Н. При выборе длины свободного конца образцов учитывали малую продольную устойчивость меди. Интересно также отметить на осциллограмме снижение напряжения на свариваемых деталях, связанное, по нашему мнению, с увеличением площади контакта. Это происходит до 25 мс, после чего напряжение возрастает в соответствии с увеличением сопротивления свариваемых деталей при нагревании.

При исследовании варьировались время сварки и напряжение заряда конденсаторов, которое определяет значение сварочного тока. Результаты зависимости прочности соединений от переменных параметров режима представлены на рис. 9. Поскольку напряжение зарядки конденсаторов измеряется значительно точнее, чем импульсный ток разряда, в качестве аргумента было выбрано первое.

Зависимости прочности стыковых соединений от напряжения заряда и времени сварочного тока показывают наличие оптимума параметров режима. Если рост прочности при повышении напряжения зарядки конденсаторов (значения

сварочного тока) и времени разряда легко объясняется увеличением площади соединения при росте энергии, расходуемой при сварке, то снижение прочности после прохождения точки экстремума, как показало изучение сварных образцов, связано с выплавлением значительного количества материала (рис.10). Вследствие этого, при оптимальном значении второго параметра остатка твердого металла в зажимах сварочной головки было недостаточно для надежного его деформирования при осадке. Увеличение же вылета проволоки из цангового зажима приводило к потере продольной устойчивости. При повышении значений параметров режима выше приведенных на рис. 9 прочность снизилась до нуля, так как проволока полностью выплавлялась вплоть до контакта цанговых зажимов.

Особенностью стыковых соединений различных металлов является более интенсивный нагрев проволоки из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al по сравнению с медной проволокой, имеющей большую электропроводность, несмотря на меньший диаметр.

В сварных образцах наблюдается утонение проволоки из сплава на основе системы Cu–Al

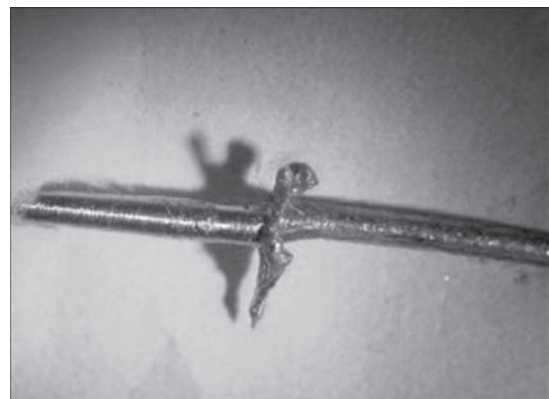


Рис. 10. Образец соединения медной проволоки диаметром 0,8 мм (справа) с проволокой из сплава на основе Cu–Al диаметром 1,0 мм, полученного стыковой конденсаторной сваркой ( $I = 1152$  А,  $t = 40$  мс)



(рис. 10) в результате увеличения пластичности при нагревании и сдавливания цангой пластичного металла, а также заметная осадка медной проволоки. Благодаря осадке, как показывают металлографические исследования, соединение произошло в твердой фазе с непрерывной границей. Это обеспечило прочность соединения на уровне прочности медного провода, т. е. при испытании на растяжение усилие разрушения достигло 200 Н, или около 400 МПа.

Попытки стыковой сварки алюминиевой проволоки и проволоки из сплава на основе Cu–Al не дали положительного результата. Это объясняется большой разницей термомеханических свойств материала, а именно, сохранением упругости сплава на основе Cu–Al при температуре потери упругости алюминием и связанной с этим потерей формы проволоки раньше, чем достаточно нагреется функциональный сплав.

### Выводы

1. Сплавы с эффектом памяти формы системы Cu–Al, благодаря низкой стоимости, имеют перспективу технического применения в системах автоматики тепловых устройств, крепежных соединений элементов конструкций, претерпевая значительную деформацию без механического разрушения. Этим обусловлена актуальность разработки технологии их соединения в однородном сочетании и в сочетаниях с другими конструкционными металлами.

2. Нахлесточные и стыковые соединения сложного легированного сплава с эффектом памяти формы на медноалюминиевой основе, полученные методами импульсной контактной сварки разрядом конденсаторов, не только равнопрочны с основ-

ным металлом, но и показывают практическую неизменность функциональных характеристик.

3. В зависимости от деформационных характеристик детали точечные сварные соединения исследованного сплава могут быть получены как с литым ядром, так и схватыванием в твердом состоянии. При этом поверхностные пленки (кроме окалины) не оказывают отрицательного влияния на сварные соединения.

4. Возможно получение стыковых соединений проволоки из СЭПФ системы Cu–Al с медной проволокой, что позволяет проектировать изделия с восстановлением формы нагреванием проходящим электрическим током.

5. Применение сварочной установки нового типа с бестрансформаторным разрядом суперконденсаторов для стыковой сварки проволок показало возможность точного управления тепловложением методом варьирования времени включения разрядного тока при практически постоянном его значении, задаваемом напряжением зарядки конденсаторов. Осциллографирование последовательных разрядов при постоянных установочных параметрах режима позволяет оценить отклонение от номинального значения энергии не более 0,5 Дж.

1. Коваль Ю.Н., Лободюк В.А. Деформационные и релаксационные явления при превращениях мартенситного типа. – К.: Наук. думка, 2010. – 287 с.
2. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения / В.Э. Гюнтер, В.Н. Ходоренко, Ю.Ф. Ясенчук, Т.Л. Чекалкин и др. – Томск: Изд-во МИЦ, 2006. – 296 с.
3. Оцука К. Симидзу К. Эффекты памяти формы в сплавах. – М.: Наука, 1979. – 232 с.
4. Свариваемость сплавов системы Ti–Ni с эффектом памяти формы / Б. Е. Патон, Д. М. Калеко, Ю. Н. Коваль, В. М. Слепченко // Автомат. сварка. – 2006. – № 5. – С. 3–10.
5. Моравский В.Э., Ворона Д.С. Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. – К.: Наук. думка, 1985. – 272 с.

Поступила в редакцию 01.09.2015

Испытательная лаборатория сварочных аэрозолей и средств защиты сварщиков  
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины  
(аккредитована в соответствии с требованиями ДСТУ ISO/IEC 17025)

ПРЕДОСТАВЛЯЕТ СЛЕДУЮЩИЕ УСЛУГИ:

- ◆ сертификационные испытания защитных щитков и масок сварщиков;
- ◆ гигиеническую оценку сварочных материалов, способов сварки и родственных технологий;
- ◆ определение показателей уровней выделений вредных веществ, образующихся при сварочных процессах, с целью инвентаризации источников промышленных выбросов в атмосферу;
- ◆ определение напряженности магнитного поля, интенсивности оптического излучения и уровня шума при работе сварочного оборудования;
- ◆ подготовку раздела технических условий на сварочные материалы и технологии по требованиям безопасности и охране окружающей среды.

Адрес: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины,  
03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11, Тел.: (044) 200–48–10