

PACS numbers: 06.60.Vz, 62.20.fg, 64.70.kd, 81.05.Vx, 81.20.Vj, 81.30.Kf, 84.37.+q

Импульсная конденсаторная сварка функциональных сплавов на основе системы Cu–Al и её влияние на структуру зоны соединения

Д. М. Калеко^{*}, С. Н. Кедровский, Ю. Н. Коваль, В. Н. Слепченко

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадского, 36,
03680, ГСП, Киев, Украина*

^{}Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
ул. Казимира Малевича, 11,
03680, ГСП, Киев-150, Украина*

Наличие ряда достоинств у сплавов с эффектом памяти формы (СЭПФ) системы Cu–Al, а именно, высокотемпературного интервала термоупругих мартенситных превращений и относительно невысокой стоимости, позволяет надеяться на увеличение их промышленного изготовления и технического применения. Поэтому актуальным является исследование металлографической структуры и функциональных характеристик соединений, полученных импульсными методами сварки. К таким методам сварки относятся конденсаторная сварка сопротивлением (точечная и стыковая) и дугоконтактная ударная конденсаторная сварка. Исследование микроструктуры и механических характеристик показало, что в зависимости от условий сварки можно получить соединения, как в твёрдом состоянии, так и с участием металла, закристаллизовавшегося в зоне сваривания. Это относится как к однородным соединениям, так и к соединениям конструкционных материалов (медь, низкоуглеродистая и нержавеющей стали) с

Corresponding author: Sergiy Mykolayovych Kedrovsky
E-mail: sergey.ua88@mail.ru

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03680 Kyiv, Ukraine*

^{}E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine,
11 Bozhenko Str., 03680 Kyiv-150, Ukraine*

D. M. Kaleko, S. M. Kedrovsky, Yu. M. Koval', and V. M. Slepchenko, Pulse Condenser Welding of Functional Cu–Al Alloys and Its Effect on the Structure of the Joint Area, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 12: 1663–1680 (2015) (in Russian).

СЭПФ системы Cu–Al. Резистометрические исследования сварных образцов, полученных импульсными методами сварки, показали практически сохранение функциональных характеристик СЭПФ в массе образцов. Сделан вывод о возможности применения импульсных методов сварки для соединения СЭПФ системы Cu–Al как в однородном, так и в разнородном сочетании с конструкционными металлами.

Ключевые слова: сплавы с эффектом памяти формы, сплавы Cu–Al, конденсаторная сварка металлов, термоупругое мартенситное превращение.

Наявність ряду переваг у стопів з ефектом пам'яті форми (СЭПФ) системи Cu–Al, а саме, високотемпературного інтервалу термопружних мартенситних перетворень і відносно невисокої вартости, уможливило сподіватися на збільшення їх промислового виготовлення та технічного використання. Тому актуальним є дослідження металографічної структури і функціональних характеристик з'єднань, одержаних імпульсними методами зварювання. До таких метод зварювання відносяться конденсаторне зварювання опором (точкове і стикове) і дугоконтактне ударне конденсаторне зварювання. Дослідження мікроструктури і механічних властивостей продемонструвало, що в залежності від умов зварювання можна одержати напівпродукти як в твердому стані, так і за участю металу, закристалізованого в місці зварювання. Це відноситься як до однорідних з'єднань, так і до з'єднань конструкційних матеріалів (мідь, низьковуглецева та неіржавіюча сталі) з СЭПФ системи Cu–Al. Резистометричні дослідження зварних зразків, одержаних імпульсними методами зварювання, показали практично збереження функціональних характеристик СЭПФ у тілі зразків. Зроблено висновок про можливість використання імпульсних метод зварювання для з'єднання СЭПФ системи Cu–Al як в однорідному, так і в різнорідному поєднанні з конструкційними металами.

Ключові слова: сплави з ефектом пам'яті форми, сплави Cu–Al, конденсаторна зварка металів, термопружне мартенситне перетворення.

The presence of a number of advantages of Cu–Al alloys with shape-memory effect (SMA), namely, a high-temperature range of the thermoelastic martensitic transformations and a relatively low cost, allows us to hope about increase of their industrial fabrication and technical application. Therefore, the metallographic study of the structure and functional characteristics of the joints obtained by pulse welding techniques has an actuality. Such techniques are the condenser resistance welding (spot and butt) and arc-contact percussion condenser welding. As shown in the microstructure and mechanical properties' investigations, depending on the welding conditions, joints can be obtained in a solid state or with a crystallized metal in the weld area. That applies to both the homogeneous joints and the joints of structural materials (copper, low-carbon and stainless steels) with Cu–Al SMA. Resistometric investigations of welded samples obtained by pulse welding techniques show the practical retain of the SMA functional characteristics. As concluded, there is a possibility of applying pulse welding for joining Cu–Al SMA in homogeneous and heterogeneous combinations with structural metals.

Key words: shape-memory alloys, Cu–Al alloys, condenser metal welding,

thermoelastic martensitic transformation.

(Получено 8 октября 2015 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное совершенствование и развитие новых технологических процессов, появление новых видов техники, стремление к повышению эффективности существующего оборудования обуславливает расширение области применения функциональных материалов с эффектом памяти формы. Детали из таких сплавов могут нести силовую нагрузку как самостоятельный элемент или в соединении с другой деталью.

Сплавы с эффектом памяти формы системы Cu–Al, благодаря низкой стоимости, имеют перспективу технического применения в системах автоматики тепловых устройств, крепёжных соединений элементов конструкций, а также иных нагреваемых изделий, претерпевающая значительную деформацию без механического разрушения [1]. Для надёжной работы сварных изделий из этих сплавов очень важным является систематическое изучение влияния условий сварки и геометрических размеров свариваемых объектов на структурные особенности материала, как в зоне шва, так и за его пределами, включая прочностные характеристики свариваемых изделий. Проведённые ранее исследования [2] показали надёжность соединения методами конденсаторной сварки изделий из сплавов с эффектом памяти формы системы Ti–Ni. Сваренные таким способом пластины и тонкие проволоки сохраняли свои функциональные свойства за пределами зоны термического воздействия. Однако данные по сварке СЭПФ системы Cu–Al практически отсутствуют. Перспективность импульсных методов соединения СЭПФ определила выбор конденсаторной сварки для соединения изделий различной формы из СЭПФ системы Cu–Al.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследования использовали проволоку диаметром 1,0 мм, фольгу и полосу с толщинами 0,05 и 0,3 мм, соответственно, а также пластины толщиной 8 мм из сложнолегированного сплава Cu–Al, химический состав которого приведён в табл. 1. Следует отметить, что выбранный состав обеспечивает проявление, эффекта памяти при рабочих значениях нагрева до 350°C, чем выгодно отличается от двойных сплавов [3].

Исследовали структуру соединения приведённого выше сплава как в образцах из однородного металла, так и в образцах, сварен-

ТАБЛИЦА 1. Химический состав исследуемого сплава в исходном состоянии.**TABLE 1.** The chemical composition of the investigated alloy in the initial state.

Массовая доля элемента, %					
Ni	Co	Fe	Mn	Al	Cu
0,162	0,85	0,22	3,79	11,1	83,9

ных из исследуемого сплава с обычными металлами: медью М1, алюминием А0, сталью Ст.3 и 1Х18Н9Т.

Нахлесточные соединения плоских образцов сваривали на конденсаторной машине ТКМ-17 [4]. Особое внимание, учитывая высокую тепло- и электропроводность испытываемого 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 окалина после прокатки.

Оптимальные режимы точечной сварки определялись по результатам механических испытаний на растяжение образцов, изготовленных из фольги, на разрывной машине РМУ-005-01, а из полосы — на машине Р-05 и приведены в табл. 2.

Образцы стыковой контактной сварки проволоки получили на лабораторной установке с использованием разрядного тока суперконденсаторов, обеспечивающих постоянство электрических характеристик за время сварки. 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

ТАБЛИЦА 2. Оптимальные режимы точечной конденсаторной сварки фольги и ленты из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al с ЭПФ.**TABLE 2.** Optimal modes of the spot condenser welding of the Cu–Al SMA foil and strip.

Образец	Ёмкость конденсатора, мкФ	Напряжение зарядки конденсатора, В	Коэффициент трансформации	Число витков дросселя	Усиление сжатия, Н
Фольга $\delta = 0,05$ мм	200	600	200	140	15
Полоса $\delta = 0,30$ мм	200	750	150	140	30

конденсаторов (7–30 В), продолжительность разряда (2–10 мс), усилия сжатия (30–50 Н). Контроль величины тока и времени нагрева проводился с помощью осциллографа TDS 2004. Качество соединения определялось 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.

Для соединения проволоки с деталями заметной толщины наиболее целесообразно применение ударной конденсаторной сварки [5], которая благодаря импульсному дуговому разряду позволяет нагреть только зону осадки, прилегающую к стыку, с одновременной очисткой свариваемых поверхностей и защитой зоны сварки парами соединяемых металлов.

Изменяемыми параметрами режима сварки были ёмкость конденсаторов, напряжение их зарядки, сопротивление разрядного контура, усилие осадки, длина свободного хода (начальный зазор между свариваемыми поверхностями), полярность сварки. Длина приваренной проволоки не позволяла проверять прочность соединения на разрыв при растяжении. Поэтому определение лучшего режима проводилось изгибом соединения. Образец считался прочным, если излом происходил на расстоянии не менее двух диаметров проволоки (2 мм) от места сварки. Микроструктура образцов изучалась с помощью интегрированного оптического микроскопа для работы в отражённом свете — AXIOVERT 40 MAT. Контроль характеристических температур МП образцов сложнолегированного сплава Cu–Al и сварных соединений проводился измерением температурной зависимости электросопротивления.

2.1. Конденсаторная сварка сопротивлением

В этой части работы мы рассмотрим два типа соединения, принципиально отличающихся по области нагрева: точечную сварку нахлесточных соединений фольги и полосы, а также стыковые соединения проволоки. В первом случае давление, которое для всех способов контактной сварки играет первостепенную роль, приложено к внешней поверхности соединения, а во втором — непосредственно к стыку. Это отличие в технике процессов отражается в структуре зоны свариваемости.

2.2. Точечная конденсаторная сварка

Металлографический анализ структуры образцов точечной сварки материала различной толщины (50 и 300 мкм) показал существен-

ную разницу в типе соединения. Если при точечной сварке фольги, учитывая большую удельную нагрузку при сварке, соединение произошло в твёрдом состоянии (рис. 1, *a*), то при сварке полосы образовывалось литое ядро (рис. 1, *б*).

Из сравнения структуры центральной зоны соединения и его периферии (рис. 2) видно, что металл фольги, используемой в исследовании, имел исходную крупнозернистую структуру, которая создавалась в результате отжига фольги в процессе её изготовления протяжкой. Однако, при точечной сварке в твёрдом состоянии, вследствие интенсивного теплоотвода в электроды сварочной машины, прошла перекристаллизация металла в зоне нагрева с образованием столбчатых кристаллитов в направлении теплоотвода.

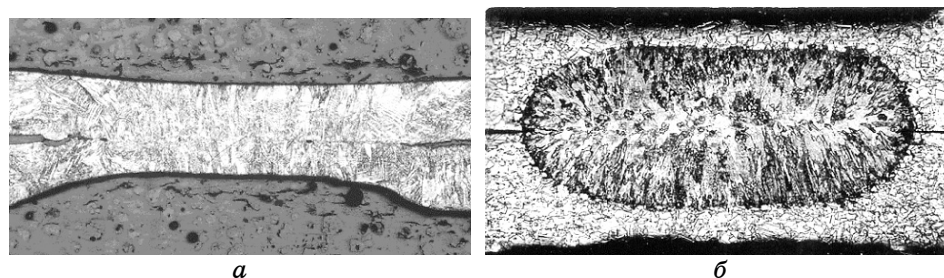


Рис. 1. Микроструктура точечного соединения фольги толщиной $\delta = 0,05$ мм (*a*) и полосы толщиной $\delta = 0,3$ мм (*б*).

Fig. 1. Microstructure of spot joint of the foil with thickness $\delta = 0.05$ mm (*a*) and the strip with thickness $\delta = 0.3$ mm (*б*).

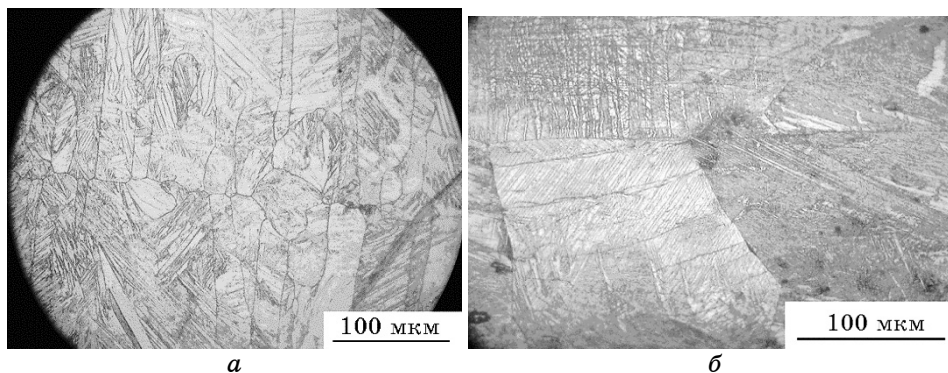


Рис. 2. Микроструктура зоны точечной сварки фольги: *a* — центральная часть, *б* — основной металл.

Fig. 2. The microstructure of the of spot welding area of the foil: *a*—the central part, *б*—base metal.

2.3. Стыковая конденсаторная сварка

Внешний вид стыкового соединения проволоки диаметром 1,0 мм из сплава системы Cu–Al показан на рис. 3.

Как показывает рис. 4, при стыковой сварке исследуемого сплава, соединение происходит в твёрдом состоянии со случайным формированием общих зёрен. Характерной особенностью микроструктуры вблизи линии раздела является наличие чётрочек, которые не убираются шлифовкой. В отличие от точечной сварки (рис. 2), исходная структура металла не изменилась, Теплоотвод в цанговые стальные зажимы при стыковой сварке значительно меньше, чем в медные электроды точечной машины.

Следует отметить, что металлографические исследования проводились с образцами, выдержавшими изгиб с изломом вне стыка.

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 $\delta = 0,05$ мм, наиболее чувствительных к нагреванию, была исследована зависимость электросопротивления от температуры в состоянии перед сваркой и после неё. Установлено, что в металле, который при сварке не подвергался термическому воздействию, изменение параметров мартенситного превращения не наблюдается (рис. 5, а). Вблизи зоны термического влияния (на расстоянии 3–5 мм) наблюдается некоторое повышение температуры конца мартенситного превращения (рис. 5, б). Непосред-

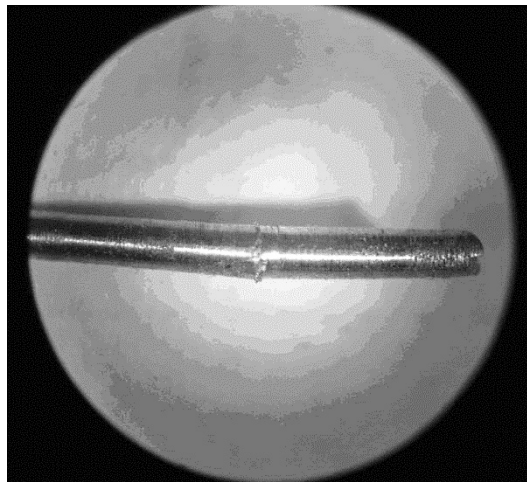


Рис. 3. Стыковое соединение проволоки диаметром 1,0 мм.

Fig. 3. Butt joint of the wire with a diameter of 1.0 mm.

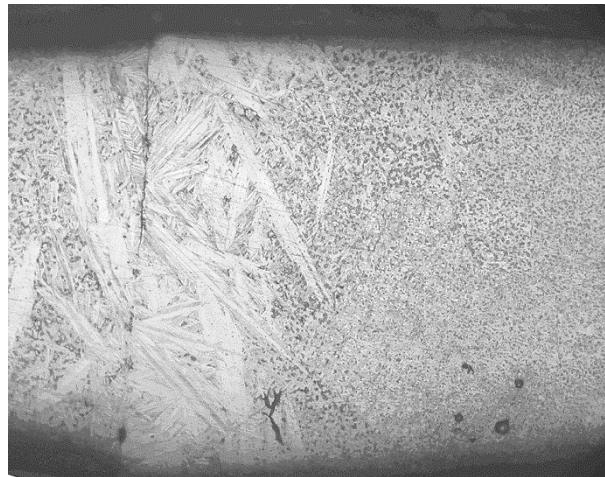


Рис. 4. Микроструктура соединения проволок диаметром 1,0 мм из сплава Cu–Al, полученного стыковой конденсаторной сваркой.

Fig. 4. Microstructure of the joint of Cu–Al wires with a diameter of 1.0 mm, obtained by a butt condenser welding.

ственно исследовать зону сварки на наличие и параметры МП не представляется возможным, ввиду её малого размера.

Резистометрия стыковых соединений также показала, что в периферийной зоне стыка изменение температуры мартенситного превращения не наблюдается.

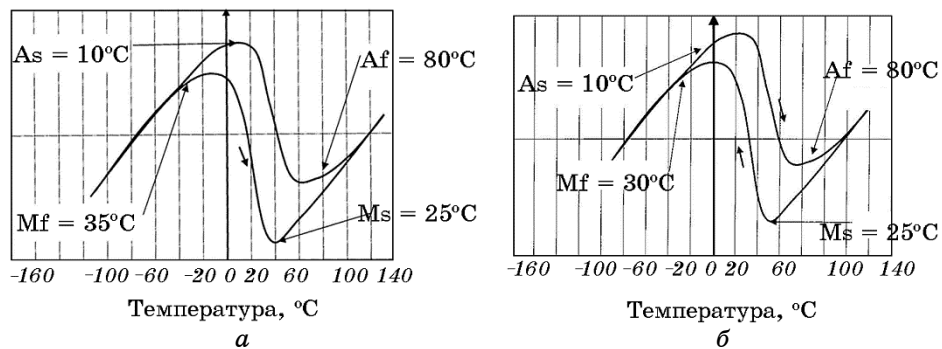


Рис. 5. Зависимость электросопротивления образцов от температуры: *a* — вне зоны термического воздействия, *б* — вблизи зоны термического воздействия сварки.

Fig. 5. Temperature dependence of the samples' resistivity: *a*—outside the heat affected zone, *б*—near the welding heat affected zone.

2.4. Сварка дуговым разрядом конденсаторов

Исследовали Т-образные соединения проволоки и пластины, полученные методом ударной конденсаторной сварки. При этом СЭПФ системы Cu–Al, участвуя в процессе в качестве одного из электродов дуги, имел либо форму проволоки ($\varnothing 1,0$ мм), либо пластины толщиной $\delta = 8$ мм. Соединения выполнялись как в однородном сочетании металлов, так и с использованием конструкционных материалов.

2.5. Сварка проволоки и пластины из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al

При соединении проволоки и пластины из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al в состоянии поставки соединение разрушалось по стыку. Изучение структуры такого соединения (рис. 6) показало, что, несмотря на обратную полярность сварки (анодное пятно дуги с более высоким тепловыделением находилась на торце проволоки), на пластинке выплавлялся глубокий кратер, препятствующий удалению расплавленного металла из зоны стыка. С целью уменьшения концентрации энергии был использован известный приём [5] искусственного повышения сечения проволоки в зоне приваривания. На рисунке 6 показаны такие соединения.

Вследствие недостаточной осадки гладкой проволоки в зоне стыка остаётся тонкий слой закристаллизованного металла, что подтверждает изучение микроструктуры (рис. 7, а). Соединение разру-

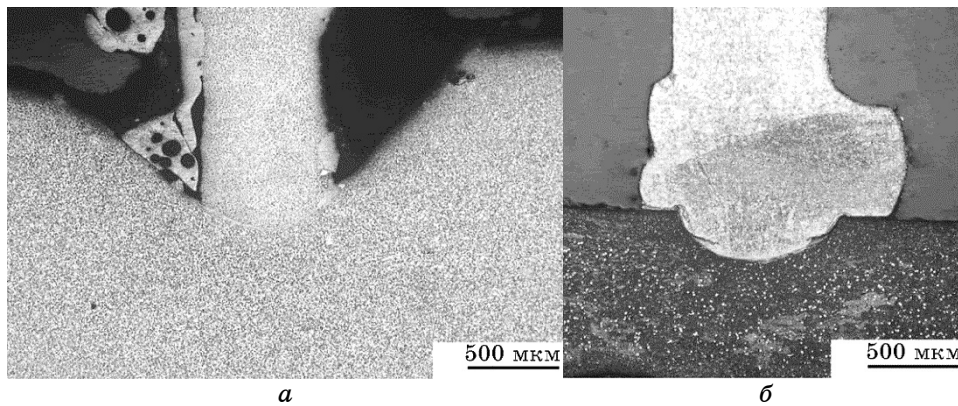


Рис. 6. Структура соединения проволоки ($\varnothing 1,0$ мм) с пластиной ($\delta = 8$ мм) без утолщения (а) и с утолщением (б) привариваемого конца проволоки.

Fig. 6. The structure of the joint of the wire ($\varnothing 1.0$ mm) with a plate ($\delta = 8$ mm) without thickening (a) and with the thickening (b) of the welded wire end.

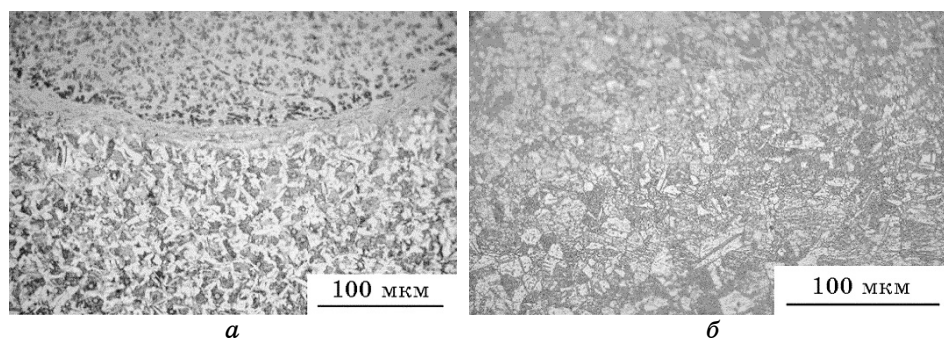


Рис. 7. Структура зоны стыка соединения с пластиной ($\delta = 8$ мм) проволоки ($\varnothing 1,0$ мм) без утолщения (*а*) и с предварительной осадкой (*б*).

Fig. 7. The joint zone structure of the plate ($\delta = 8$ mm) and wire ($\varnothing 1.0$ mm) connection without thickening (*a*) and with a preliminary upset (*b*).

шается по этому слою, имеющему, разумеется, небольшую прочность. В то же время при сварке с предварительным увеличением площади торца проволоки, благодаря снижению плотности тока и возможности приложить большее усилие осадки, удалось получить соединение в твёрдой фазе (рис.7, б). Несмотря на то, что в зоне стыка осталась линия раздела между соединяемыми металлами, увеличение площади стыка позволило создать прочное соединение.

Особенностью сплавов на медной основе является большое зерно, если металл после отливки не был обработан протяжкой или прокаткой. Это, как известно, вызывает его повышенную хрупкость. Наиболее эффективным способом измельчения зерна является скоростное охлаждение [6]. При ударной конденсаторной сварке, где время нагрева не превышает 1 мс, скорость охлаждения достигает 10^6 °C/с [5]. Такие условия приводят к измельчению зерна проволоки и пластины в зоне термического влияния (рис. 8), что улучшает пластичность металла в этой зоне. Вместе с тем, протяжённость этой зоны незначительна и не влияет на свойства изделия со сварным соединением.

2.6. Сварка проволоки из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al с разнородными металлами

В качестве конструкционных металлов для сварки со сложнолегированным сплавом на основе Cu–Al были выбраны низкоуглеродистая сталь, нержавеющая сталь, медь и алюминий. Были испытаны соединения, где сплав с ЭПФ был в виде проволоки диаметром 0,8 мм, а чужеродные металлы — в виде пластин толщиной 3 мм, а также соединения, в которых проволока из чужеродных металлов

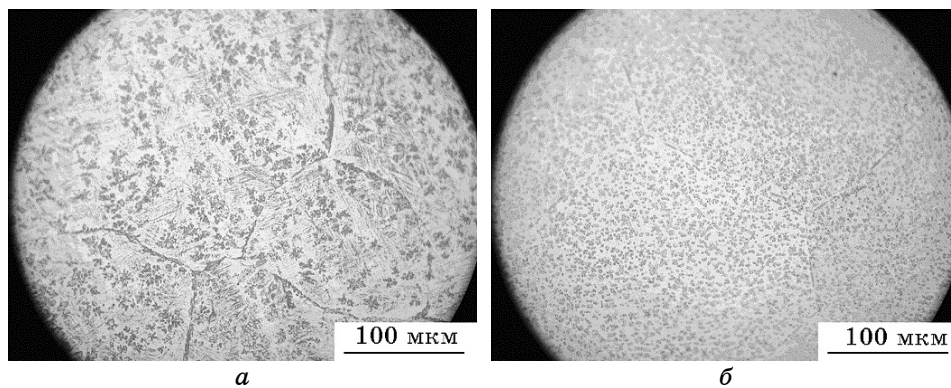


Рис. 8. Микроструктура основного металла проволоки до (а) и после ударной конденсаторной приварки (б).

Fig. 8. The base metal microstructure of the wire before (a) and after the percussion condenser welding (b).

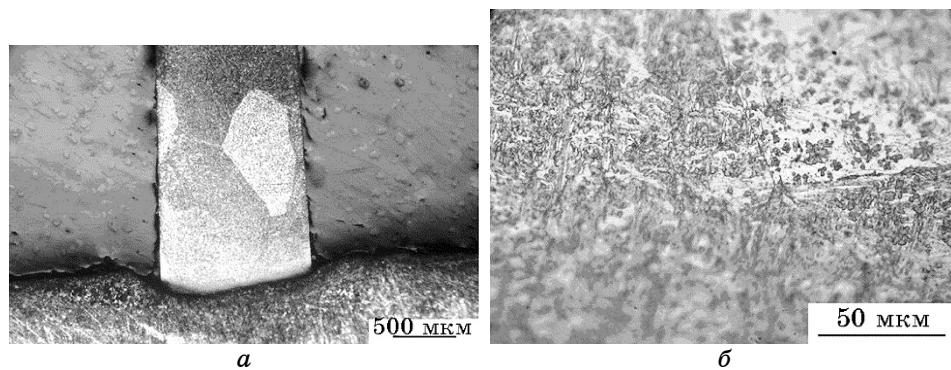


Рис. 9. Микроструктура соединения проволоки из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al с пластиной из низкоуглеродистой стали.

Fig. 9. Microstructure of the joint of Cu–Al SMA wire with a low-carbon steel plate.

приваривалась к пластине из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al толщиной 8 мм в литом состоянии. Перед сваркой поверхность пластины фрезеровали с целью очистки и выравнивания.

Металлографические исследования исходного СЭПФ и СЭПФ в соединении показывает влияние термического воздействия на структуру сплава Cu–Al (рис. 9). Проволока в состоянии поставки имеет крупное зерно (рис. 9, а), но под влиянием термомеханического цикла ударной конденсаторной сварки, зерно измельчается, пластичность металла повышается, и поэтому излом при изгибе

происходит по проволоке там, где влияние сварочного нагрева уже не ощущается. Это показывает, что импульсный нагрев при сварке не только не ухудшает структуру сплава, а, наоборот, улучшает его механические свойства, сохраняя, как показала резистометрия, функциональные характеристики, которые проявляются в массе металла.

При исследовании сварного соединения СЭПФ системы Cu–Al с низкоуглеродистой сталью, разница твёрдости соединяемых металлов приводит к появлению ступеньки, тень от которой выглядит как отсутствие сварки (рис. 9, *а*). Но при увеличении (рис. 9, *б*) видно, что соединение состоялось в твёрдой фазе, что характерно для ударной конденсаторной сварки, если металл пластины имеет твёрдость не меньшую, чем металл проволоки. К сожалению, ступенька на фотографии привела к ущербу резкости изображения со стороны низкоуглеродистой стали.

Характерным отличием соединений проволоки из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al с пластиной из нержавеющей стали является более глубокое проникновение проволоки в пластину из материала с твёрдостью меньшей, чем у обычной низкоуглеродистой стали. Но соединение произошло в твёрдой фазе.

Исходя из полученного и описанного выше опыта, для получения прочных соединений с медной пластиной площадь торца проволоки была увеличена до 1,2 мм. Микроструктура этого соединения показана на рис. 10, *а*. Несмотря на сохранение в стыке расплавленного и закристаллизовавшегося металла, соединение вследствие увеличенной площади, разрушается по проволоке (рис. 10, *б*).

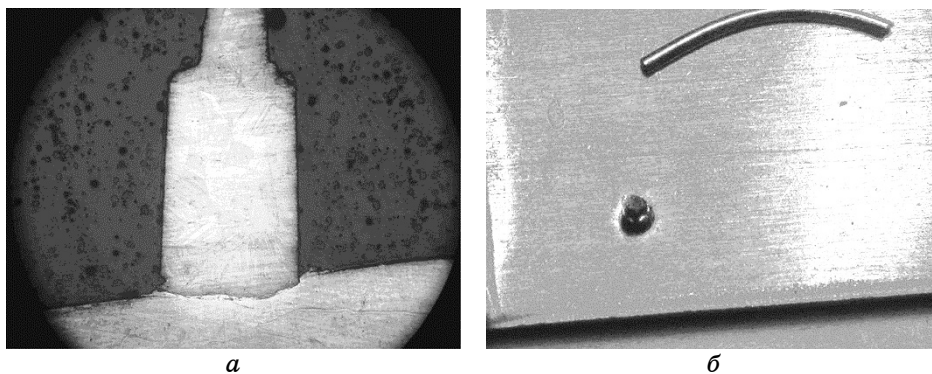


Рис. 10. Макроструктура соединения проволоки из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al с медной пластиной (*а*) и вид образца после испытания прочности изгибом проволоки (*б*).

Fig. 10. The macrostructure of the joint of Cu–Al SMA wire with a copper plate (*a*) and the sample after bending test (*b*).

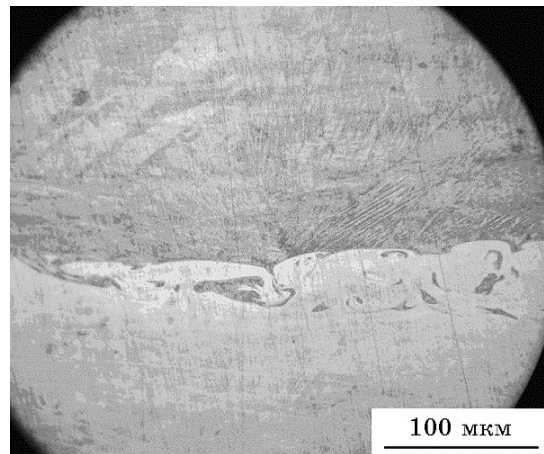


Рис. 11. Микроструктура соединений проволоки из сложнолегированного сплава на основе Cu–Al с медной пластиной.

Fig. 11. The microstructure of the Cu–Al SMA wire joints with a copper plate.

Анализ микроструктуры зоны сварки (рис. 11) также показывает наличие закристаллизовавшегося металла, не вытесненного на периферию стыка из-за осадки проволоки с увеличенной плоскостью торца. Вследствие высокой скорости охлаждения, остатки расплава кристаллизуются в причудливой форме и неравномерно по зоне соединения, как показывают фотографии на рис. 11. При этом связь между основным металлом проволоки не обязательна. Но важно то, что зона соединения не имеет разрывов, пор, или несплошностей другого вида.

2.7. Сварка проволоки из конструкционных металлов с пластиной из СЭПФ на основе Cu–Al

От присоединения стальной проволоки к сплаву с эффектом памяти формы методом ударной конденсаторной сварки (УКС) мы отказались сразу, вследствие несоответствия соотношения твёрдости стальных сплавов и сплавов системы Cu–Al требованиям технологии УКС. Исследование ограничивалось приваркой к пластине из исследуемого сплава проволоки из меди и алюминия. Выбор этих металлов определялся, во-первых, более низкой твёрдостью, а, во-вторых, возможным практическим использованием таких соединений при нагревании элементов с СЭПФ электрическим током.

При ударной конденсаторной сварке разнородных металлов, когда металл проволоки имеет твёрдость ниже, чем металл пластины, соединение происходит благодаря заметной деформации конца

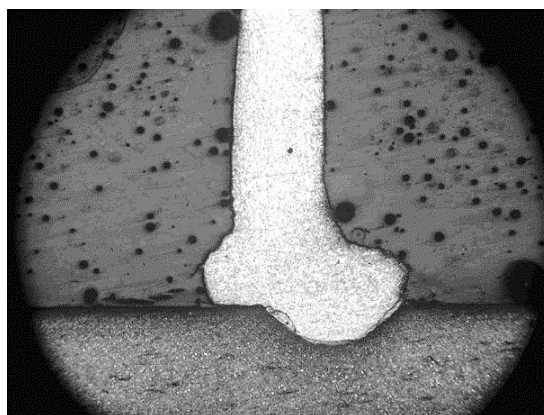


Рис. 12. Сечение ударного конденсаторного соединения медного провода ($\varnothing = 0,8$ мм) с пластиной из СЭПФ на основе Cu–Al.

Fig. 12. Cross-section of a percussion condenser connection of copper wire ($\varnothing = 0.8$ mm) with a Cu–Al SMA plate.

проволоки, нагреваемой дугowym разрядом конденсаторов. На рисунке 12 показан разрез образца с приваренной медной проволокой диаметром 0,8 мм. Можно увидеть не только деформирование медной проволоки, но также достаточно глубокое проникновение меди в СЭПФ. Последнее связано с относительно низкой температурой плавления этого сплава.

Если сравнить рис. 12 с рис. 6, б, то можно увидеть много общего между ними. Это подтверждает полезность метода увеличения диаметра привариваемого конца проволоки для повышения прочности соединения.

Микроструктура зоны соединения (рис. 13) интересна наличием вкрапления в медь островков сплава. По нашему мнению, здесь соединение может осуществляться по твердожидкостному механизму. То есть, доля жидкого металла в области стыка может сохраняться (после частичного испарения и вытеснения его большей части на периферию стыка) на поверхностях соединяемых элементов. Расплавленные сплавы могут кристаллизоваться отдельно, вследствие большой скорости охлаждения, создавая между собой соединение в твёрдой фазе, а также, проникая в металл проволоки или пластины в зависимости от соотношения их твёрдости. Замечено, что в любом случае не происходит взаимного проникновения металлов-партнёров в проволоку и в пластину. Всегда проникновение происходит либо в проволоку, либо в пластину, в зависимости от их теплофизических свойств.

Ответ о прочности соединений медной проволоки с пластиной из сложнoleгированного сплава на основе Cu–Al даёт рис. 14, на кото-

ром показан образец после испытания соединения на прочность изгибом проволоки.

Испытания свариваемости алюминиевой проволоки ($\varnothing 0,8$ мм) ударной конденсаторной сваркой с пластиной ($\delta = 1,0$ мм) из слож-нолегированного сплава на основе Cu–Al также позволили получить образцы, отвечающие всем требованиям. Общий вид соединения после испытания изгибом показан на рис. 15.

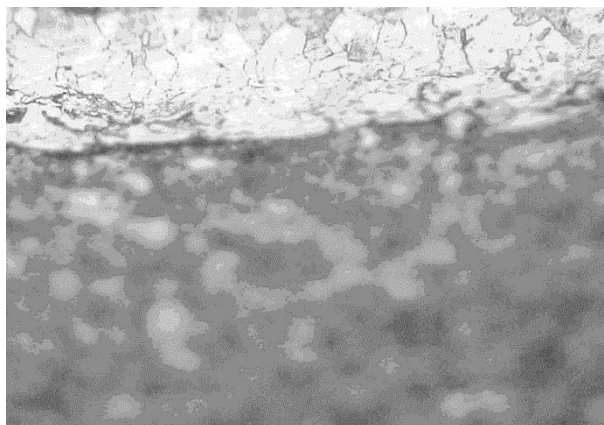


Рис. 13. Микроструктура соединения медной проволоки ($\varnothing 0,8$ мм) с пластиной ($\delta = 8$ мм), полученного ударной конденсаторной сваркой; $\times 100$.

Fig. 13. The microstructure of the joint of copper wire ($\varnothing 0.8$ mm) with a plate ($\delta = 8$ mm) obtained by a percussion condenser welding; $\times 100$.

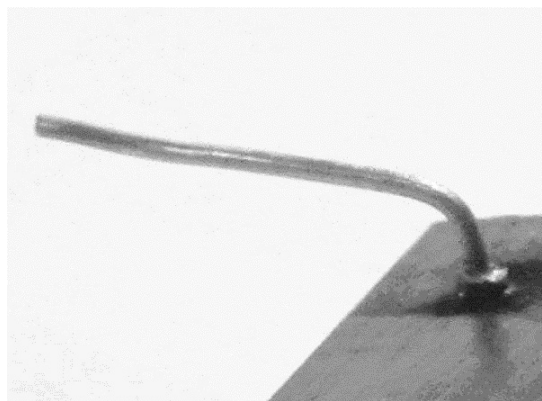


Рис. 14. Испытание прочности соединения медного провода с пластиной из СЭПФ на изгиб.

Fig. 14. Bond strength bending test of the joint of copper wire with a SMA plate.

Анализ микроструктуры этого соединения (рис. 16) показал, что оно произошло в твёрдой фазе без включения металла-партнёра, как при приварке медной проволоки.

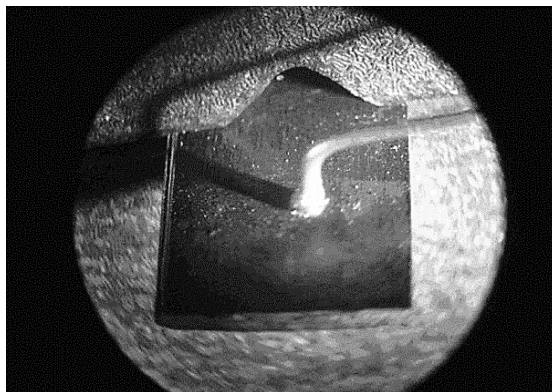


Рис. 15. Соединение алюминиевой проволоки ($\varnothing 0,8$ мм) со сложнолегированным сплавом на основе Cu–Al ($\delta = 1,0$ мм), полученное УКС, после испытания прочности изгибом.

Fig. 15. Aluminium wire ($\varnothing 0.8$ mm) joint with Cu–Al SMA ($\delta = 1.0$ mm), obtained by percussion condenser welding, after strength bending test.

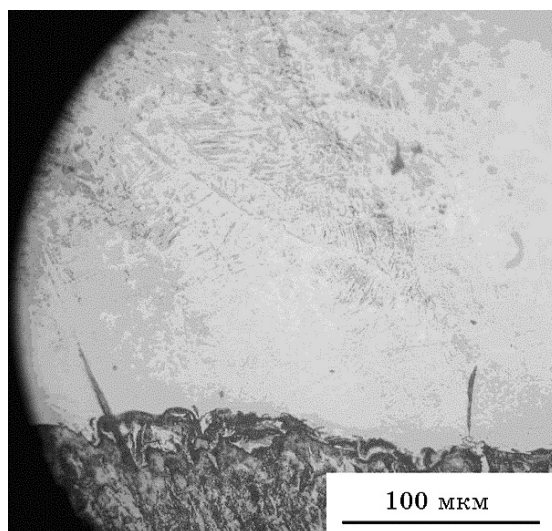


Рис. 16. Микроструктура ударного конденсаторного соединения алюминиевой проволоки ($\varnothing 0,8$ мм) с пластиной СЭПФ ($\delta = 1$ мм).

Fig. 16. The microstructure of the percussion condenser joint of aluminium wire ($\varnothing 0.8$ mm) with a SMA plate ($\delta = 1$ mm).

Отличие в характере взаимодействия металлов-партнёров при сварке объясняется близостью температур плавления меди и СЭПФ ($\cong 1150^\circ\text{C}$), в то время как температура плавления алюминия намного ниже ($\cong 660^\circ\text{C}$).

Осадка медной проволоки происходит при твердожидком состоянии, как проволоки, так и пластины, в то время как СЭПФ кристаллизуется раньше алюминия и алюминиевая проволока деформируется при осадке в тот момент, когда металл СЭПФ уже твёрдый. В первом случае возможно перемешивание остатков жидкого металла на соприкасающихся поверхностях, а во втором — жидкий металл алюминия выжимается на периферию соединения.

3. ВЫВОДЫ

1. Показана принципиальная возможность соединения различными методами сварки сплавов с ЭПФ на основе системы Cu–Al в однородном сочетании и с конструкционными материалами.
2. В зависимости от метода и условий сварки получены соединения высокого качества в твёрдой фазе и с образованием литого ядра.
3. Функциональные характеристики сплава на основе Cu–Al при различных видах сварки (твердофазная или с образованием литого ядра) сохраняются в полной мере, причём не имеет места смещение характеристических температур мартенситного превращения.
4. При ударной конденсаторной сварке медной проволоки с пластиной из СЭПФ, как и проволоки из функционального сплава с медной пластиной, с повышенным усилием осадки обнаружено измельчение зерна в зоне термического воздействия.
5. Соединения проволоки из СЭПФ с углеродистой и нержавеющей сталью, а также пластины из СЭПФ с алюминиевой проволокой протекают в твёрдой фазе, в то время как сварка с медью осуществляется по твердожидкостному механизму.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. И. И. Корнилов, О. К. Белоусов, Е. В. Качур, *Никелид титана и другие сплавы с эффектом «памяти»* (Москва: Наука: 1977).
2. Б. Е. Патон, Д. М. Калеко, Ю. Н. Коваль, В. М. Слепченко, *Автоматическая сварка*, № 5: 3 (2006).
3. К. Оцука, К. Симидзу, *Эффекты памяти формы в сплавах* (Москва: Наука: 1979).
4. В. Э. Моравский, Д. С. Ворона, *Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки* (Киев: Наукова думка: 1985).
5. Д. М. Калеко, В. Э. Моравский, Н. А. Четвертко, *Ударная конденсаторная сварка* (Киев: Наукова думка: 1984).
6. Г. Г. Зак, Г. З. Затульский, *Проблемы литья*. № 2: 80 (1998).

REFERENCES

1. I. I. Kornilov, O. K. Belousov, and E. V. Kachur, *Nikelid Titana i Drugie Sistemy s Effektom 'Pamyati'* (Moscow: Nauka: 1977) (in Russian).
2. B. E. Paton, D. M. Kaleko, Yu. N. Koval, and V. M. Slepchenko, *Avtomaticheskaya Svarka*, No. 5: 3 (2006) (in Russian).
3. K. Otsuka and K. Simitsu, *Effekty Pamyati Formy v Splavakh* [The Shape Memory Effect in Alloys] (Moscow: Nauka: 1979) (Russian translation).
4. V. E. Moravskiy and D. S. Vorona, *Tekhnologiya i Oborudovanie dlya Tochechnoy i Rel'yefnoy Svarki* (Kiev: Naukova Dumka: 1985) (in Russian).
5. D. M. Kaleko, V. E. Moravskiy, and N. A. Chvertko, *Udarnaya Kondensatornaya Svarka* (Kiev: Naukova Dumka: 1984) (in Russian).
6. G. G. Zak and G. Z. Zatul'skiy, *Problemy Lit'ya*, No. 2: 80 (1998) (in Russian).