

## СОЕДИНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ Cu–Al С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ДУГОКОНТАКТНОЙ СВАРКИ

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

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины.

03680, г. Київ-142, бульвар Акад. Вернадского, 36. E-mail: metall@imp.kiev.ua

Сплавы с эффектом памяти формы, изменяющие конфигурацию детали при нагревании, а также сохраняющие упругость при деформации до 8...10 %, находят все большее применение в промышленных изделиях и аппаратах в качестве термоактивируемых элементов. Техническое использование сплавов системы Cu–Al вместо хорошо изученного сплава системы Ti–Ni (нитинола) позволяет снизить стоимость изделия и расширить область применения до высоких температур (около 400 °С). Расширение номенклатуры изделий с элементами из сплавов с эффектом памяти формы требует изучения возможности соединения металлов этой системы с конструкционными металлами, в частности, с крепежом типа шпилек. Исходя из имеющегося опыта, были изучены соединения шпилек из низкоуглеродистой стали марки Ст.3 и нержавеющей 12X18H9T, а также латуни Л63 и алюминиевого сплава АМг3 методами дугоконтактной сварки разрядом конденсаторов и импульсом постоянного тока. Получены хорошие результаты при конденсаторной приварке шпилек из перечисленных материалов, кроме АМг3. Последнее объясняется большим несоответствием теплофизических свойств соединяемых металлов. При сварке постоянным током, вследствие увеличения времени сварки, прочные соединения получены лишь со шпильками из стали Ст.3. Показано, что импульсные методы сварки дают возможность сохранения функциональных характеристик деталей из сплавов с эффектом памяти формы. Обнаружена неоднородность структуры металла стыка при сварке разнородных материалов, которая объясняется малой продолжительностью существования расплава (неполным перемешиванием) и гетерогенностью и неодновременностью кристаллизации кластеров соединения. Положительным следствием этого является отсутствие в стыке хрупких интерметаллидов типа FeAl<sub>3</sub> и сохранение пластичности при деформации соединений со стальными шпильками. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 9.

*Ключевые слова:* сплавы с эффектом памяти формы, медноалюминиевые сплавы, дугоконтактная сварка, конструкционные материалы, термоупругое мартенситное превращение

Современная техника все более заинтересована в применении материалов с особыми свойствами, позволяющими создавать устройства, самоактивирующиеся при изменении внешних условий. Специфические характеристики таких материалов дают возможность упрощения конструкции и, как следствие, повышение надежности работы исполнительных узлов аппаратов. К таким материалам относятся, среди прочих, сплавы с эффектом памяти формы (СЭПФ).

Эти сплавы вызывают все больший интерес в разных отраслях промышленности, медицины и культуры благодаря возможности практического использования их термоупругой характеристики — способности восстанавливать при нагревании заданную форму после деформации в холодном состоянии. Кроме термоупругости (изменение формы под действием напряжений, возникающих при кристаллографических превращениях), эти сплавы характеризуются еще и широко используемыми свойствами сверхупругости — сохранение упругих характеристик при относительно больших деформациях.

Из большого количества известных сплавов с эффектом памяти формы сегодня наиболее изучены и распространены сплавы на основе двух систем — Ti–Ni и Cu–Al. Каждая из них имеет как достоинства, так и недостатки. Нитинол лучше других удовлетворяет требованиям медицинского применения, а именно, имеет высокую коррозионную стойкость, биоинертность и биосовместимость, а также хорошие механические характеристики (предел текучести превышает 1 ГПа, упругая деформация до 8 %, модуль упругости порядка 70 МПа). В то же время в большинстве примеров немедицинского применения можно использовать более дешевые сплавы на основе меди, технология изготовления и термообработки которых хорошо известна. Кроме относительно низкой стоимости медно-алюминиевые СЭПФ по сравнению с нитинолом имеют более высокий граничный температурный интервал мартенситных превращений, что позволяет их использовать в устройствах, которые работают при высоких температурах, например, в автоматических системах пожаротушения.

ния или термических установках типа печей, котлов или паропроводов.

Промышленное применение любых материалов, в том числе и СЭПФ, требует решения задач их соединения между собой или с другими материалами. Ранее [1, 2] мы показали, что характеристики СЭПФ систем Ni–Ti и Cu–Al при импульсной сварке сохраняются, и, следовательно, такой класс сварочных процессов может применяться для соединения этих сплавов при использовании в термоактивируемых конструкциях.

Следует отметить, что рассмотренные ранее методы сварки и характерные малые размеры образцов позволяли ограничиваться импульсами тока продолжительностью до нескольких миллисекунд. Это было удобным для получения сварных соединений в медицинских изделиях и приборостроении. Однако применение медно-алюминиевого сплава в энергетическом машиностроении требует увеличения свариваемого сечения и, соответственно, продолжительности сварочного нагрева и количества подводимой энергии.

В настоящей работе изучена возможность соединения пластин из СЭПФ системы Cu–Al с крепежом в виде шпилек из конструкционных сплавов разных марок. Сложность задачи определяется не только поведением сплава с ЭПФ в соединении, но и металлургической совместимостью разнородных металлов, включающей сочетания сплавов железа и цветных металлов. Рассмотрены традиционные методы приварки шпилек — сварка разрядом конденсаторов (методами «с контактом» и «с зазором») и дугой постоянного тока [3]. Эксперименты по конденсаторной приварке шпилек проводились на аппарате К-747МВ [4], по дуговой — на аппарате GLV 650 фирмы HBS (Германия).

**Конденсаторная приварка шпилек.** При выборе режима конденсаторной приварки шпилек переменными параметрами были емкость конденсаторов, напряжение их заряда, высота подъема (при сварке по методу «с зазором») и усилие осадки (таблица). Результаты испытаний соединений на разрыв показали, что не со всеми материалами удалось получить прочные соединения. Это относится, в частности, к приварке шпилек из алюминиевого сплава АМг3. Прочные и стабильные соединения были получены только со шпильками из этого сплава диаметром не больше М3 методом сварки «с контактом». У стандартной шпильки в соответствии с ISO 13918 отношение площади

Режимы сварки различных шпилек с листовым материалом из сплава системы Cu–Al

Материал шпильки	Шпилька с резьбой	Емкость конденсаторов, мФ	Напряжение заряда конденсаторов, В	Усилие осадки, Н	Высота подъема, мм
Сварка по методу «с контактом»					
Сталь Ст.3	М3	96	60	15	-
	М6	96	100	15	-
	М8	96	150	15	-
Сталь 12Х18Н9Т	М3	72	75	15	-
	М6	96	125	10	-
	М8	96	150	10	-
Латунь Л63	М3	48	100	10	-
	М6	60	125	10	-
	М8	96	175	10	-
Сплав АМг3	М3	72	80	15	-
Сварка по методу «с зазором»					
Сталь Ст.3	М3	96	80	-	3
	М8	96	150	-	3
Латунь Л63	М3	36	75	-	2
	М6	72	125	-	2

соединения (площади буртика на привариваемом конце шпильки) к площади сечения шпильки для М3 максимальное<sup>1</sup> (рис. 1). Наличие буртика на шпильке при конденсаторной приварке вызвано необходимостью повысить прочность соединения до уровня прочности основного металла без увеличения энергии для создания усиления вокруг тела шпильки. Снижение сварочного тока обеспечивает возможность конденсаторной приварки шпилек к тонкому листу, сохранения декоративного или функционального покрытия на обратной стороне листа и сварку разнородных металлов.

При определении режима сварки, обеспечивающего получение прочных соединений, соответствие качества сварных образцов условию излома по телу шпильки проверялось экспресс-методом — изгибом шпилек в соответствии со стандартом ISO 14555.

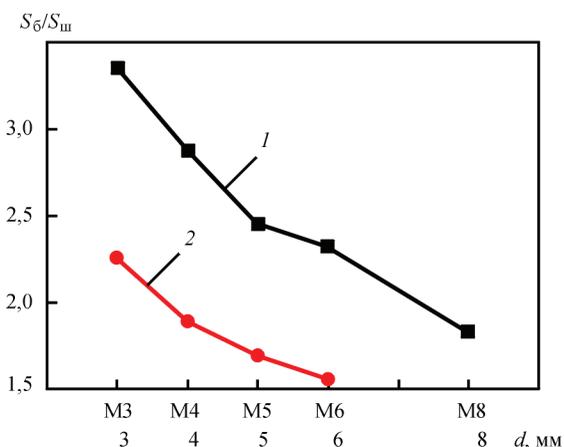


Рис. 1. Стандартное отношение площади торца буртика на шпильке к сечению шпилек с резьбой (1) и гладких шпилек (2)

<sup>1</sup> Скорее всего, это связано с условиями изготовления шпилек холодной высадкой.

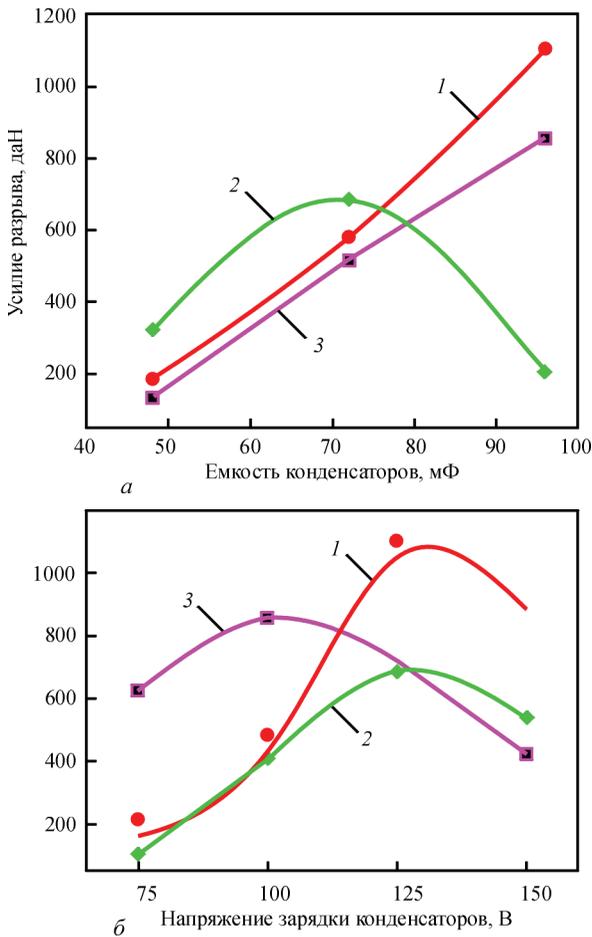


Рис. 2. Зависимость прочности сварных соединений шпилек М6 из различных металлов с пластинами из СЭПФ системы Cu–Al от емкости (а) и напряжения заряда конденсаторов (б): 1 — сталь 12X18H9Т; 2 — латунь Л63; 3 — сталь Ст.3

Зависимость прочности соединений на растяжение от параметров режима сварки исследовалась на шпильках диаметром М6. Результаты этих измерений показаны на рис. 2.

Влияние емкости конденсаторов на прочность соединений при сварке «с контактом» определялось при постоянной величине напряжения заряда конденсаторов, которое отвечает оптимальному значению, приведенному в таблице, а именно,

100 В для стали Ст.3, 125 В — для шпилек из стали 12X18H9Т и латуни Л63. Анализ кривых зависимости усилия разрыва от емкости конденсатора (рис. 2, а) показал, что для стальных шпилек при максимальной емкости конденсаторов режим сварки остается еще энергетически неисчерпанным, но достигнутая прочность уже соответствует удельным характеристикам материала. В то же время приварка шпилек из более легкоплавкой латуни с превышением оптимальной величины энергии, накопленной в конденсаторах, приводит к уменьшению прочности образцов. Это вызвано, как показал визуальный анализ, выплавлением значительной части привариваемого буртика. При растяжении разрушение происходит по телу буртика с вырывом шпильки.

Поскольку накопленная в конденсаторах энергия имеет квадратичную зависимость от напряжения заряда, влияние последнего существеннее, чем величины емкости. Это иллюстрирует рис. 2, б. Определение зависимости прочности соединений от напряжения заряда конденсаторов проводилось со шпильками М6 при емкости конденсаторов, определенной как оптимальная (таблица). Кривые и осмотр образцов показали, что при низком заряде конденсаторов накопленной энергии недостаточно для расплавления всей стыкуемой поверхности буртика на торце шпильки. При этом в сварном соединении на периферии буртика сохраняется подрез. При превышении оптимальной величины накопленной энергии в стыке, как показал анализ излома, появляются поры, уменьшающие площадь соединения. Визуальный анализ обнаружил одновременное повышение выплеска жидкого перегретого металла, что также снижает площадь соединения и создает щель между шпилькой и листом.

Одним из определяющих параметров режима конденсаторной приварки шпилек является усилие осадки. При сварке по методу «с контактом», результаты которого обсуждены выше и при ко-

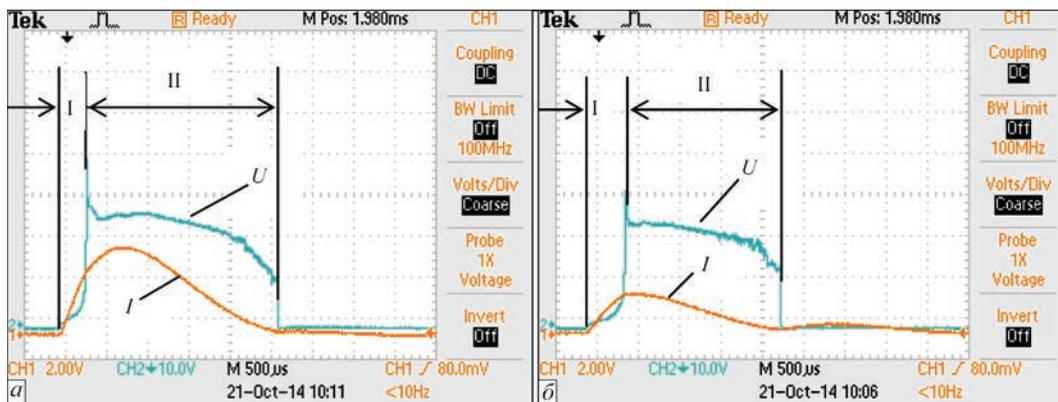


Рис. 3. Осциллограммы тока *I* и напряжения *U* между свариваемыми деталями во время приварки шпильки М8 из нержавеющей стали методом «с контактом» и давлением пружины 50 (а) и 60 Н (б) (емкость конденсаторов 96 мФ, напряжение зарядки 150 В)

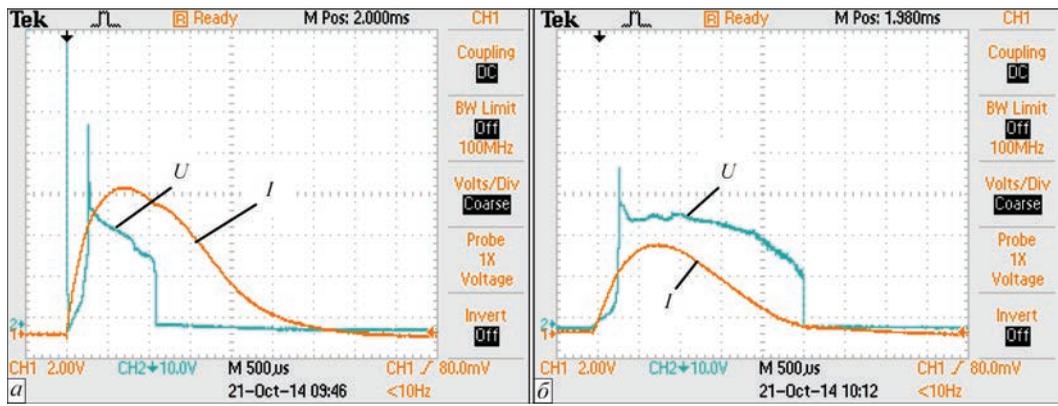


Рис. 4. Осциллограммы сварочного тока  $I$  и напряжения на дуге  $U$  при конденсаторной приварке шпилек М8 из низкоуглеродистой стали методом «с зазором» (а) и «с контактом» (б) (емкость конденсаторов 96 мФ, напряжение заряда 150 В)

тором осадка производится до возбуждения дуги взрывом тонкого выступа на торце шпильки, усилие определяет время выдержки деталей под разрядным током (рис. 3). Отчетливо наблюдается влияние контактного сопротивления на продолжительность нагрева взрывающегося выступа (участок I) на осциллограмме напряжения. Сравнение осциллограмм показывает, что задержка возбуждения дуги (рис. 4, б) приводит к уменьшению продолжительности дуговой стадии разряда (участок II на кривой напряжения).

На приведенных осциллограммах также наблюдается снижение амплитудного значения тока и напряжения между свариваемыми деталями (электродами дуги) при увеличении давления пружины сварочной головки. Эти изменения вызваны противодействием давления пружины осадки и давления пара взрывающегося выступа. Увеличение давления пара при перегреве выступа продолжительным прохождением тока приводит к возрастанию электрического сопротивления дугового промежутка (сравнимого с сопротивлением разрядного контура), что вызывает снижение тока, а повышенное давление пружины сокращает длину дуги, изменяя ее напряжение.

Следующая серия экспериментов относится к дугоконтактной конденсаторной приварке шпилек методом «с зазором». Этот метод отличается от ранее рассмотренного тем, что разрядный ток включается тогда, когда шпилька, которая в начале процесса сварки была оторвана (в обесточенном состоянии) от листа, под действием пружины сварочного устройства приходит в контакт с листом. В этот момент происходит замыкание контура тока и начинается выгорание неровностей на торце тонкого выступа шпильки.

Основные отличия процессов возбуждения дуги при конденсаторной приварке шпилек и возбуждения дуги взрывающимся выступом демон-

стрируют осциллограммы сварочного тока и напряжения на дуге (рис. 4).

Во-первых, при сварке по методу «с зазором» стадия возбуждения дуги (образования дугового промежутка) короче, чем при сварке по методу «с контактом». Об этом можно судить по задержке возрастания напряжения, сопровождающему «взрыв» выступа. На приведенных осциллограммах эта разница составляет около 20 мкс при начальном зазоре<sup>2</sup> 3 мм. Следует обратить внимание, что всплеск напряжения в момент возбуждения дуги при сварке «с зазором» больше, чем при сварке «с контактом», поскольку начальный объем плазмы в первом случае меньше, чем во втором, и, к тому же, он сжимается подвижным зажимом со шпилькой. Это приводит к повышению сопротивления в момент возбуждения дуги, которое быстро снижается до характерной величины сопротивления при обычном напряжении дугового разряда.

Во-вторых, продолжительность дуговой стадии разряда при сварке «с зазором» значительно меньше, чем при сварке «с контактом». Это отличие объясняется возбуждением дуги при выгорании микронеровностей в месте контакта в первом варианте и «взрывом» выступа во втором. При испарении выступа давление паров больше, чем при горении дуги между выступом и листом, что приводит, как следует из сказанного выше, к увеличению длины дуги. Это предположение подтверждается более высоким напряжением на дуге на рис. 4, б. Кроме того, на время горения дуги влияет также инерционность подвижной массы сварочного устройства, которая противодействует давлению паров металла. С учетом этого, при сварке с подвижной шпилькой по методу «с зазором» дуговая стадия разряда короче, чем при сварке «с контактом», когда в начале процесса происходит «зависание» подвижной массы и, та-

<sup>2</sup> Величина первичного зазора влияет на усилие, при котором деформируются неровности на торце. Чем больше зазор, тем больше усилие сжатия, и тем меньше контактное сопротивление, которое вызывает термическое возбуждение дуги при испарении неровностей на поверхности торца.

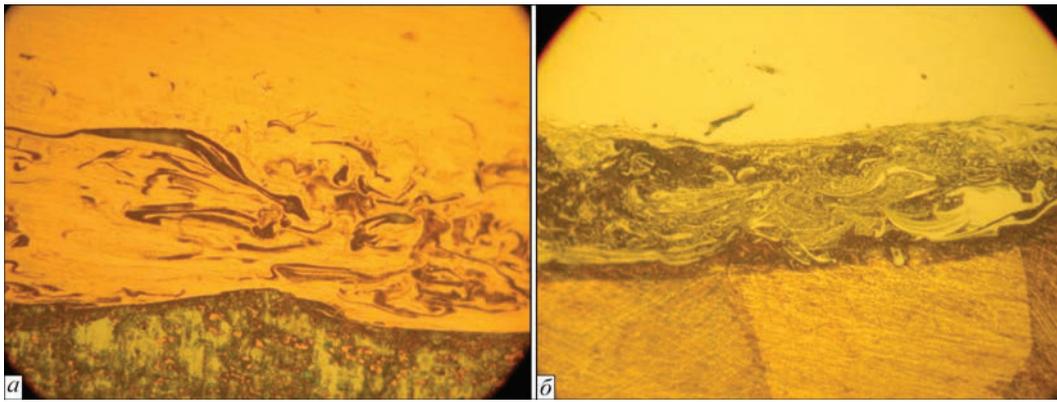


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 500$ ) соединений шпилек М6 из низкоуглеродистой (а) и нержавеющей (б) стали

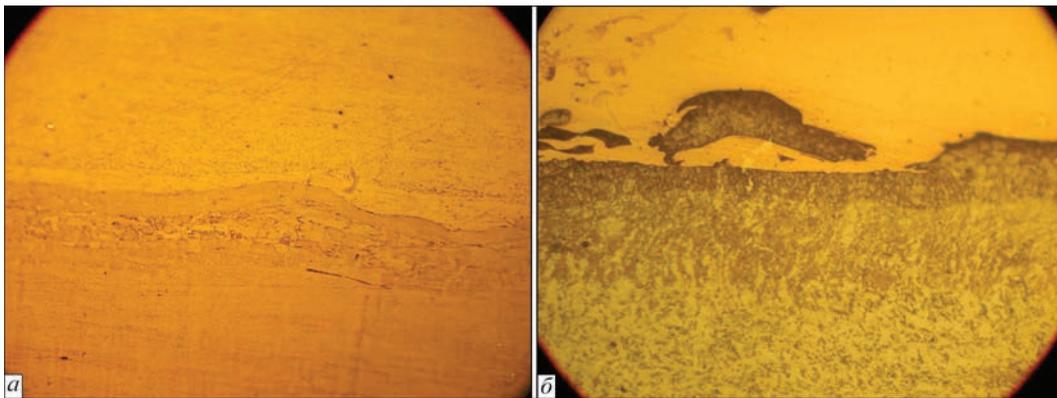


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 500$ ) соединений шпилек М6 из латуни Л63 (а) и сплава алюминия АМг3 (б)

ким образом, увеличивается время горения дуги. Укорочение дуги при сварке «с зазором» и соответствующее уменьшение сопротивления разрядного контура приводит к увеличению амплитудного значения тока.

Особенности процессов конденсаторной приварки шпилек разными методами определили ограниченный успех в приварке шпилек к листам из СЭПФ системы Cu–Al методом сварки «с зазором». Как показывает таблица, этим методом удалось приварить только шпильки из низкоуглеродистой стали в диапазоне диаметров М3–М8, что соответствует пределам установки К747МВ, а также из латуни диаметрами М3 и М6. При экспериментах с другими металлами не удалось избежать подрезов и трещин в металле стыка.

Известны трудности соединения сплавов железа с алюминиевыми сплавами, связанные с охрупчиванием металла стыка вследствие образования интерметаллидов Fe–Al разного стехиометрического состава. Однако при испытании наших соединений стальных шпилек со сплавом системы Cu–Al на ударный изгиб по ISO 14555 образцы выдерживали пластичный изгиб на  $90^\circ$ . Не выявлены также интерметаллические включения. По-видимому, таких соединений нет или они рассеяны в матрице в виде дисперсных частиц, не выявляемых металлографическим

анализом, что подтверждается и дюрOMETрическими исследованиями области стыка.

Типичная микроструктура зоны сварки стальных шпилек с листом из СЭПФ системы Cu–Al приведена на рис. 5. Характерным для нее является наличие слоя, в котором расплавленный металл шпильки смешан с металлом листа (зона темного цвета). Поскольку температура плавления СЭПФ ниже (почти на  $400^\circ\text{C}$ ), чем у материала шпилек, последний кристаллизуется в первую очередь, заземляя металл СЭПФ. Это отражается и в том, что в стыке стали Ст.3, имеющей температуру плавления  $1530^\circ\text{C}$ , меньше заземленного сплава, чем в стыке нержавеющей стали, имеющей температуру плавления около  $1400^\circ\text{C}$ , ближе к температуре плавления СЭПФ, составляющей около  $1000^\circ\text{C}$ .

Менее контрастный вид имеют микроструктуры соединений шпилек из металлов, родственных с составляющими сплава Cu–Al, а именно, из латуни Л63 и алюминиевого сплава АМг3 (рис. 6). Учитывая близость температур плавления, свариваемые между собой металлы кристаллизуются в стыке почти одновременно, и поэтому заземляется лишь незначительная часть легкоплавкой фазы. Это иллюстрирует сравнение микроструктур соединения шпилек из Л63 (рис. 6, а), в которых расплавленный металл обоих элементов соединения закристаллизовался почти одновременно, и из АМг3 (рис. 6, б), сплава более

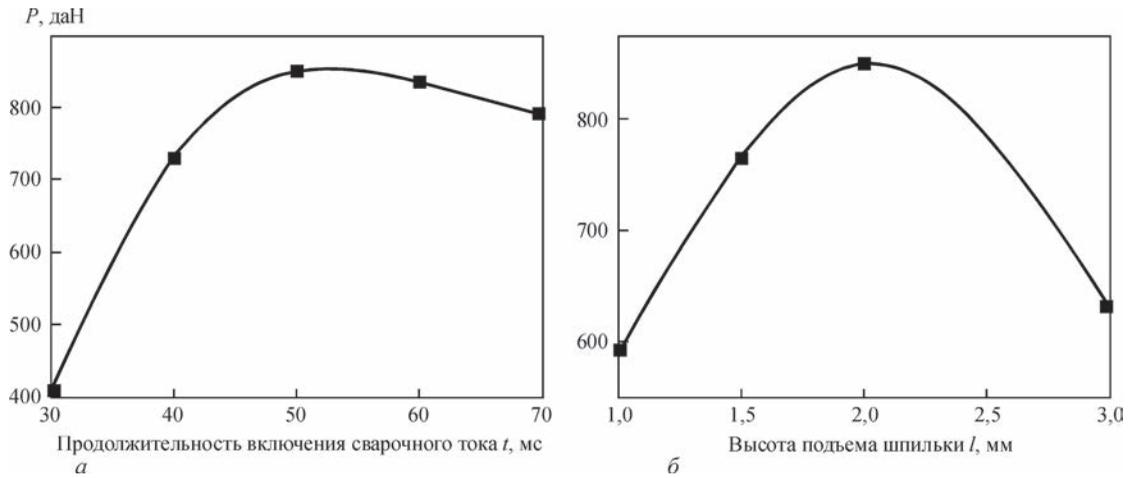


Рис. 7. Влияние параметров режима дугоконтактной приварки стальных шпилек М6 к листу СЭПФ системы Cu–Al толщиной 8 мм на прочность соединений: а — l = 2 мм; б — t = 50 мс

легкоплавкого, чем сложнoleгированный сплав системы Cu–Al, и поэтому последний сохранился в виде островка в алюминиевом сплаве. На приведенных фотографиях микроструктур видно, что поверхность соединений плотная, без пор или других несплошностей.

**Приварка шпилек постоянным током.** Значение тока при конденсаторной приварке шпилек составляет несколько килоампер, в то время как при сварке постоянным током тех же сечений шпилек значение тока не превышает 1 кА. Продолжительность процесса дугоконтактной приварки шпилек более чем на порядок превышает время конденсаторной сварки. Вследствие этого, каждый из этих способов дугоконтактной сварки имеет свою область применения.

Благодаря малой длительности процесса, конденсаторная сварка имеет преимущества в возможности присоединения шпилек к тонкому листу с соотношением толщины к диаметру шпильки 1:10 (при сварке постоянным током это соотношение составляет 1:6 для шпилек до М12 или 1:4 для шпилек большего диаметра) и возможность соединения с деталями, имеющими теплоустойчивые покрытия, например, из полимера, слоя краски или другого декоративного материала. Но недостатком этого способа сварки, который также связан с кратковременностью процесса, является необходимость точного удержания перпендикулярности оси шпильки и поверхности листа, к которому она приваривается, в пределах до 7°. Это, разумеется, требует повышенной квалификации сварщика и ограничивает производительность операции.

Такого недостатка, в определенной степени, лишен способ дугоконтактной приварки шпилек постоянным током.

Эксперименты проводили с резьбовыми шпильками из низкоуглеродистой стали Ст.3 и нержавеющей 12Х18Н9Т, а также алюминиевого

сплава АМг3 стандартной формы, имеющих буртик, превышающий сечение шпильки на величину, указанную в таблице, который оканчивается конусом с углом при вершине 165°.

Аппарат GLV 650, на котором проводили эксперименты, не позволяет регулировать значение сварочного тока, которое номинально составляет 650 А, и его полярность, которая аппаратно установлена прямой, поэтому регулируемые параметрами были только продолжительность импульса сварочного тока и высота подъема шпильки. Шпильки из АМг3 приваривали в среде аргона, который подавался в зону сварки с расходом 15 л/мин с предварительным продувом в течение 10 с. Соединения оценивали по прочности на ударный изгиб и растяжение, а также по внешнему виду. Прочные соединения удалось получить только на шпильках из стали Ст.3.

Учитывая возможные области применения соединений с приваренными шпильками, их диаметр был ограничен размерами М6 и М8, поэтому из возможных разновидностей дугоконтактной приварки шпилек постоянным током был выбран способ сварки «коротким циклом», при котором время сварки не превышает 100 мс.



Рис. 8. Образцы приварки стальных шпилек М6 с разной продолжительностью нагрева

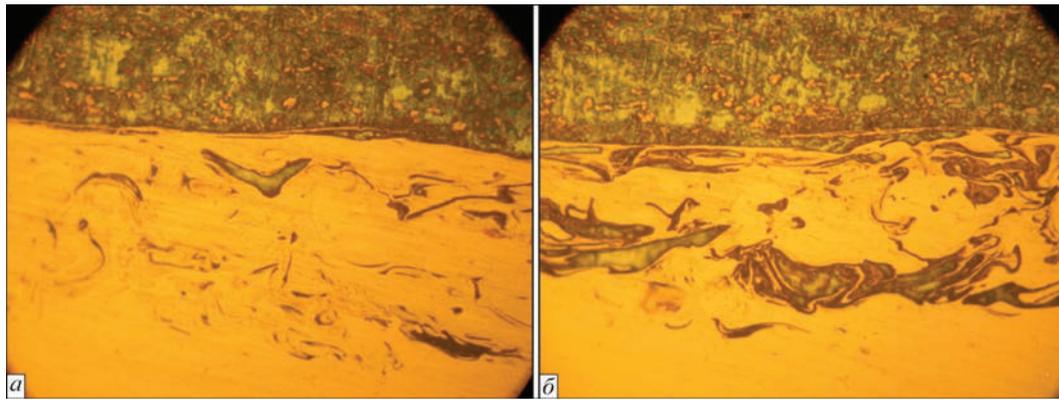


Рис. 9. Микроструктура ( $\times 500$ ) зоны сварки шпильки М6 из низкоуглеродистой стали со сплавом системы Cu–Al (внизу). Продолжительность импульса сварочного тока 50 (а) и 70 (б) мс

Соединения со шпильками М6 из сплава АМгЗ разрушались по месту сварки при изгибе на угол до  $10^\circ$ . Изменение параметров режима сварки в широких пределах не позволило получить прочные соединения.

Анализ места излома дает возможность сделать предположение, что причиной неудачного эксперимента является несоответствие теплофизических характеристик свариваемых материалов. Энергии, достаточной для расплавления поверхности шпильки, оказалось недостаточно для плавления листа на глубину, которая обеспечивает создание прочного соединения. Если же увеличить продолжительность сварочного тока до значения, достаточного для создания на поверхности листа удовлетворительного объема расплавленного металла, то полностью плавится буртик на привариваемой шпильке. Это, разумеется, снижает прочность соединения. Последующие эксперименты со стальными шпильками подтвердили данное предположение.

Влияние параметров режима сварки на прочность сварных соединений было исследовано при сварке стальных шпилек М6 с листом  $\delta = 8$  мм. Полученные результаты в виде графиков зависимости прочности соединения от продолжительности импульса сварочного тока и высоты подъема шпильки на стадии возбуждения дуги приведены на рис. 7. Анализ графиков свидетельствует о существовании узкого оптимума параметров сварочного режима, соответствующего прочностным свойствам соединения, сопоставимыми с прочностью материала на отрыв. Отклонение от них снижает прочность соединения из-за недостаточной продолжительности процесса (от зазора между шпилькой и листом в момент начала их сближения и включения сварочного тока пропорционально зависит время горения дуги) или чрезмерного нагрева, приводящего к значительному выплеску металла из зоны приварки (рис. 8), образованию пор и соответствующему снижению площади соединения.

Изучение и анализ результатов испытаний на ударный изгиб в соответствии со стандартом ISO 14555 соединения (рис. 8) и сравнение их с графиками

(рис. 7, а) позволяет сделать вывод, что соединения, выдержавшие это испытание, не всегда равнопрочны с основным металлом.

Исследования металлографической структуры образцов этой композиции выявили неоднородность металла зоны совместной кристаллизации, а именно, присутствие в основной матрице материала, который закристаллизовался отдельно от основной массы (рис. 9). Обобщая с приведенным выше анализом рис. 5 и 6 можно сделать вывод о том, что неодновременность кристаллизации соединяемых материалов типична для импульсной дугоконтактной сварки разнородных металлов. При возрастании времени сварки зона соединения становится более разнородной за счет обогащения стальной составляющей (рис. 9, б).

Изучение изломов соединения стальных шпилек с медноалюминиевым сплавом показало пластический характер разрушения. Это свидетельствует о том, что при импульсном режиме сварки хрупкие интерметаллиды не образуются. Как показал микроструктурный анализ дугоконтактных сварных соединений, зона термического влияния, величину которой определяли по измельчению зерна медно-алюминиевого сплава [5], не превосходит 0,2 мм. Сохранение структуры основной массы СЭПФ, как показали более ранние исследования [2], обеспечивает также и сохранение функциональных характеристик сварного изделия.

### Выводы

1. Для присоединения крепежных деталей из стали и цветных металлов к сложнолегированному сплаву системы Cu–Al были испытаны два метода дугоконтактной сварки — разрядом конденсаторов и постоянным током, известные как методы конденсаторной и дуговой приварки шпилек.

2. Изучение прочностных характеристик и металлографической структуры показало, что импульсные методы дугоконтактной сварки позволяют получить прочные соединения крепежных

деталей в разнородном сочетании со сплавом системы Cu–Al, характеризующимся эффектом памяти формы. Благодаря малой продолжительности сварки сплав сохраняет функциональные характеристики. Это позволяет существенно расширить номенклатуру изделий с этим сплавом, отличающимся высокой коррозионной и износостойкостью при относительно низкой стоимости.

3. Из двух разновидностей конденсаторной приварки шпилек для выполнения разнородных соединений предпочтительнее применять метод сварки «с контактом», который благодаря относительно низкому току и большей продолжительности нагрева позволяет приваривать шпильки М3 – М8 из латуни Л63, низкоуглеродистой и нержавеющей сталей. Из-за существенной разности в температурах плавления не удалось получить соединения со шпильками из АМг3 диаметром более 3 мм.

4. При дугоконтактной сварке постоянным током из-за существенного увеличения времени сварки прочные соединения с СЭПФ системы Cu–Al удалось получить только со шпильками из низкоуглеродистой стали. Шпильки из цветных металлов и нержавеющей стали выплавлялись без сохранения на привариваемом конце стандартного буртика, повышающего прочность соединения до прочности основного металла.

5. Анализ микроструктуры дугоконтактных сварных соединений разнородных металлов продемонстрировал неоднородность зоны сварки. В матрице закристаллизовавшейся фазы сохраняются включения более легкоплавкой составляющей. Соединяемые металлы, вследствие кратковременности процесса и высокой скорости охлаждения, не создают единую структуру. Положительное следствие данного процесса проявилось в пластичности разрушения соединений со стальными шпильками, благодаря отсутствию в стыке хрупких интерметаллидов типа FeAl<sub>3</sub>.

1. Свариваемость сплавов системы Ni–Ti с эффектом памяти формы / Б. Е. Патон, Д. М. Калеко, В. П. Шевченко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2006. – № 5. – С. 3–10.
2. Сварка сопротивлением сплава системы медь–алюминий с эффектом памяти формы / Б. Е. Патон, Д. М. Калеко, С. Н. Кедровский [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 12. – С. 3–8.
3. Лебедев В. К. Разработка технологии и оборудования для дугоконтактной приварки крепежных деталей к листовым и другим поверхностям изделий / В. К. Лебедев, Д. М. Калеко, Н. А. Чвертко // Сварочное производство. – 1994. – № 4. – С. 14–16.
4. Установка К747МВ для конденсаторной приварки шпилек / Д. М. Калеко, Б. И. Кононец, Н. Н. Осельдько [и др.] // Сварочное производство. – 1991. – № 6. – С. 25–27.
5. Импульсная конденсаторная сварка функциональных сплавов на основе системы Cu–Al и ее влияние на структуру зоны соединения / Д. М. Калеко, С. Н. Кедровский, Ю. Н. Коваль [и др.] // Металлофизика и новейшие технологии. – 2015. – т. 37, № 12. – С. 1663–1680.

Поступила в редакцию 10.10.2016

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ  
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»

**Міжнародна конференція  
ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ**

Присвячується 100-річчю  
Національної академії наук України

5 – 6 грудня, 2018 р.  
Україна, м. Київ

Голова:  
академік НАН України Л. Лобанов

**НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ**

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали
- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

Відправлення тез доповідей для участі в роботі конференції – до 01.11.2017 р.

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,  
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03680  
тел.: (38044) 200-60-16; 200-47-57; факс: (38044) 528-04-86  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
www.paton.kiev.ua | www.patonpublishinghouse.com