

## ПЛАЗМЕННО-ДУГОВАЯ ПАЙКА СТАЛИ 08кп С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИПОВЕВ СИСТЕМЫ Cu–Mn–Ni–Si

С.В. Максимова, И.В. Зволинский

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Представлены результаты высокотемпературного дифференциального термического анализа припоев на базе системы Cu–Mn–Ni–Si, металлографические исследования паяных соединений стали 08кп, полученных с использованием плазменно-дугового нагрева. Показано, что при легировании системы Cu–Mn–Ni кремнием снижается температура плавления сплава и повышается его смачивающая способность. Микрорентгеноспектральным анализом определено, что паяный шов соединений стали 08кп состоит из твердого раствора на основе меди и дисперсных выделений фазы, обогащенных кремнием. На межфазной границе припой–основной металл в виде тонкой полосы (вдоль паяного шва) формируется фаза на основе железа, содержащая повышенную концентрацию кремния и марганца, что свидетельствует об образовании силицидов сложного состава. Прочность паяных соединений повышается с увеличением концентрации никеля в сплаве и составляет 367 МПа (среднее значение). Библиогр. 9, табл. 2, рис. 6.

*Ключевые слова:* плазменно-дуговая пайка, припой, микроструктура, растекание, температура солидуса и ликвидуса, прочность

Пайка наряду со сваркой является одним из наиболее распространенных способов получения неразъемных соединений. Важнейшее достоинство пайки — формирование паяного шва при температуре ниже температуры автономного плавления соединяемых материалов. При пайке используют различные источники нагрева, в том числе, концентрированные — дугу, плазму и др. В настоящее время технологический процесс пайки с применением плазменно-дугового нагрева используют при изготовлении различных деталей и узлов в приборостроении, автомобилестроении, в электротехнической, авиационной промышленности и др. [1–3].

В данной работе представлены результаты высокотемпературного дифференциального термического анализа и исходная структура припоев системы Cu–Mn–Ni–Si, показаны особенности формирования микроструктуры паяных соединений конструкционной углеродистой стали 08кп при использовании плазменно-дугового нагрева.

Экспериментальные сплавы получали методом литья на «холодной» подложке с использованием дугового нагрева. Температуры солидуса и ликвидуса определяли с использованием высокотемпературного дифференциального анализа (ВДТА) в среде гелия. Плазменно-дуговую пайку стыковых соединений листовой углеродистой стали 08кп выполняли на специальном лабораторном стенде, в качестве источника нагрева использовали установку КЕМРПИ MasterTIG MLS 2300 AC/DC, которая применяется для аргонодуговой сварки, и блок поджига дежурной дуги. Растекание припоев по подложке основного металла проводили в за-

щитной среде аргона, а также в смеси аргона + 10 % водорода.

Из полученных паяных соединений вырезали образцы для изготовления микрошлифов и проведения металлографического и микрорентгеноспектрального анализа с помощью растрового электронного микроскопа TescanMira 3 LMU, оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-max 80 mm<sup>2</sup> под управлением программного пакета INCA. Локальность измерений составляла до 1 мкм. Распределение элементов и съемку микроструктур проводили в обратно-отраженных электронах (BSE), позволяющих исследовать микрошлифы без химического травления.

В качестве базового использовали припой Cu–23,5Mn–9Ni [4], который имеет температуру солидуса 920 °С и ликвидуса 955 °С. Однако при исследовании растекания по углеродистой стали 08кп в условиях дугового нагрева он показал неудовлетворительный результат. С целью улучшения растекания припоя использовали легирование кремнием (1...3 мас. %), который является универсальным депрессантом для многих припоев [5–8].

Анализ результатов высокотемпературного дифференциального термического анализа экспериментальных припоев, содержащих высокую концентрацию никеля, показал, что введение 3 мас. % кремния снижает температуру солидуса до 903 °С и температуру ликвидуса до 949 °С. Дальнейшее снижение температуры ликвидуса примерно на 56 °С (899 °С) удалось получить при более низком содержании никеля.

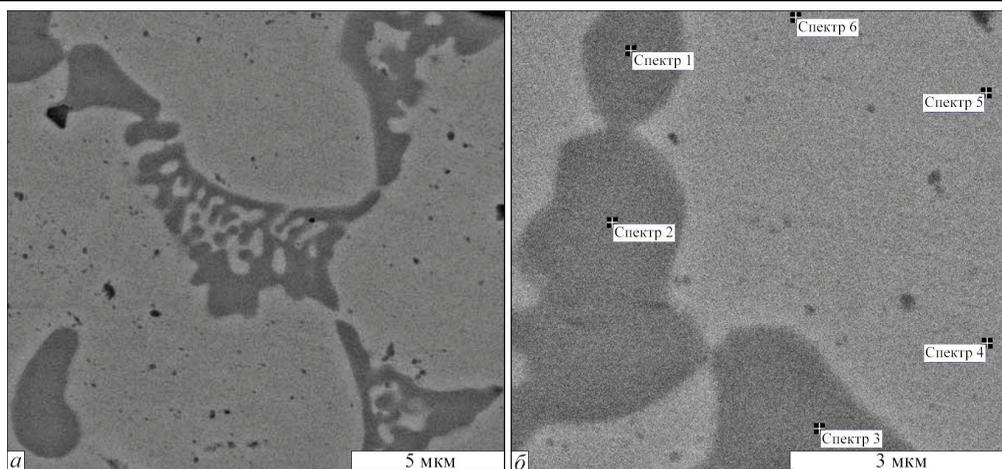


Рис. 1. Микроструктура (а) и исследуемые участки (б) припоя системы Cu–Mn–Ni–3Si в исходном литом состоянии

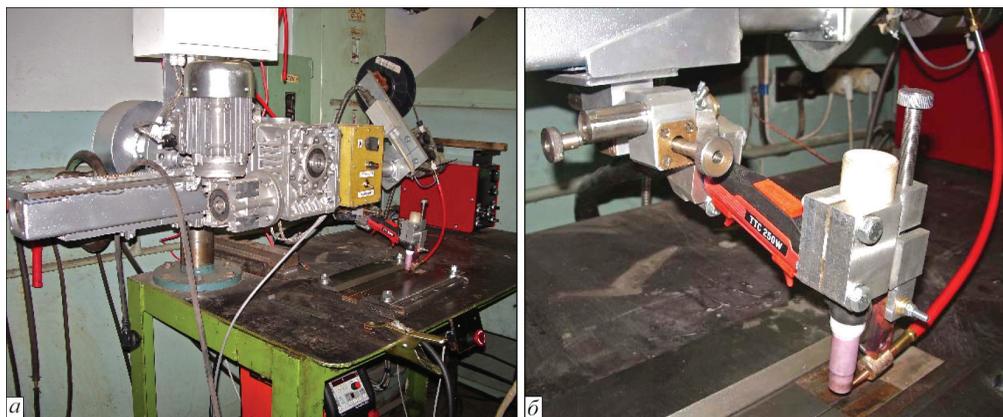


Рис. 2. Специальный стенд для плазменно-дуговой пайки (а) и узел перемещения горелки (б)

Структура припоев системы Cu–Mn–Ni–3Si двухфазная: дендриты твердого раствора, по границам которых кристаллизуется фаза, обогащенная кремнием (рис. 1, а, б, табл. 1).

Локальным микрорентгеноспектральным анализом определено дискретную концентрацию кремния в твердом растворе и показано, что она не превышает 1,95 мас. %, в то время, как в фазе, которая выделяется по границам зерен, его концентрация повышается до 7,9 мас. % (рис. 1, б, табл. 1).

При исследовании растекания припоев использовали специальный лабораторный стенд (рис. 2, а), который позволяет перемещать и фиксировать горелку, а также подложку основного металла (рис. 2, б).

Припой использовали в литом виде, контролировали навеску припоя, расстояние от торца

**Таблица 1.** Распределение химических элементов в отдельных фазах в припое Cu–Mn–Ni–3Si

Номер спектра	Химические элементы, мас. %			
	Si	Mn	Ni	Cu
1	7,40	28,68	3,52	60,40
2	7,90	30,30	3,36	58,44
3	7,55	29,83	4,06	58,56
4	1,95	12,61	0,38	85,06
5	1,72	12,22	0,46	85,61
6	1,91	12,28	0,59	85,22

электрода до припоя и температуру. Термопару крепили с обратной стороны подложки. Нагрев припоя осуществляли на постоянном токе в защитной среде аргона и в смеси аргона с водородом. Проведенные эксперименты по растеканию припоя при дуговом (TIG) нагреве в среде аргона показали, что введение кремния в сплав системы Cu–Mn–Ni заметно увеличивает площадь растекания припоя. Наиболее интенсивно его влияние наблюдается при содержании 2...3 мас. % крем-

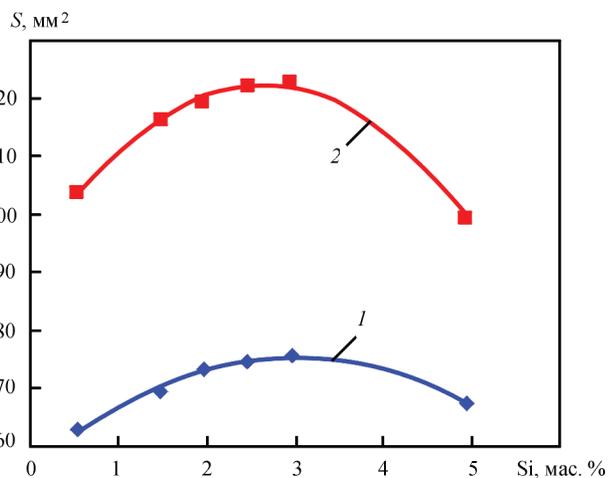


Рис. 3. Зависимость площади растекания припоя от содержания Si при дуговом нагреве в аргене (1) и смеси аргона с водородом (2)

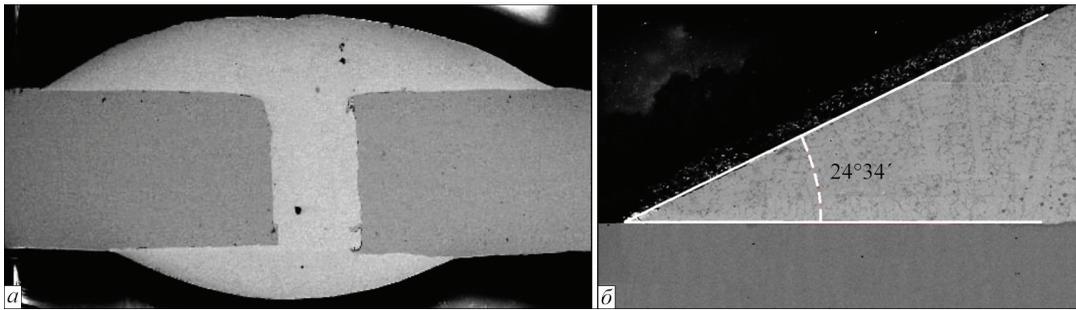


Рис. 4. Общий вид паяного соединения (а), угол смачивания (б) углеродистой стали 08кп припоем Cu–Mn–Ni–3Si в условиях плазменно-дугового нагрева

ния (рис. 3). Дальнейшее увеличение содержания кремния до 5 мас. % приводит к уменьшению площади растекания.

Аналогичная зависимость наблюдается при исследовании растекания припоя в защите смеси аргона с 10 % водорода, но площадь растекания существенно увеличивается (рис. 3, кривая 2). Объяснить данную зависимость можно тем, что водород является активным восстановителем.

На базе опытных сплавов изготовлены припой в виде порошковых проволок диаметром 2,9 и 3 мм соответственно, которые использовали для проведения плазменно-дуговой пайки образцов стали 08кп (в среде аргона). Подачу припоя в виде проволоки осуществляли вручную.

В процессе отработки технологического процесса плазменно-дуговой пайки установлены оптимальные режимы ( $I = 50 \text{ A}$ ,  $U = 14 \text{ В}$ ), которые обеспечивают хорошее формирование валика припоя, смачивание основного металла и величину контактного угла  $24^{\circ}34'$  (рис. 4, а, б).

Наблюдается формирование прямой и обратной галтели. Исследования микроструктуры швов паяных соединений, полученных с использованием двух припоев, не выявило значительных отличий. Большую часть шлифа занимают зерна

твёрдого раствора на основе меди, содержащие незначительное количество кремния (1,38 мас. %). По границам зерен твёрдого раствора выделяется фаза на основе меди, обогащенная кремнием (до 7,93...8,45 мас. %), что подтверждает присутствие силицидов (рис. 5, табл. 2).

В обоих случаях на межфазной границе припой – основной металл вдоль паяного шва кристаллизуется диффузионный слой на основе железа, обогащенный кремнием (до 10,23...13,08 мас. %) и марганцем (13,58...15,92 %), что свидетельствует о формировании силицидов железа сложного состава (рис. 4, табл. 2) и хорошо согласуется с диаграммами состояния металлических систем. Так, в соответствии с бинарными диаграммами состояния системы железо-кремний предельная растворимость кремния в  $\gamma$ -железе при  $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет 3,84 ат. %. С понижением температуры она уменьшается, что и приводит к образованию силицидных фаз [9]. Растворимость меди в железе ограничена и тоже уменьшается со снижением температуры. Такие особенности строения диаграмм состояния металлических систем железо-кремний и медь-кремний способствуют тому, что при пайке на межфазной границе формируются силициды железа.

Как свидетельствуют результаты механических испытаний на разрыв стыковых плоских паяных образцов, полученных с помощью плазменно-дуговой пайки и припоя Cu–Mn–Ni–3Si, разрушение происходит по шву. Наблюдается большой разброс показателей прочности от 279 до 379 МПа (рис. 6), средние значения прочности составля-

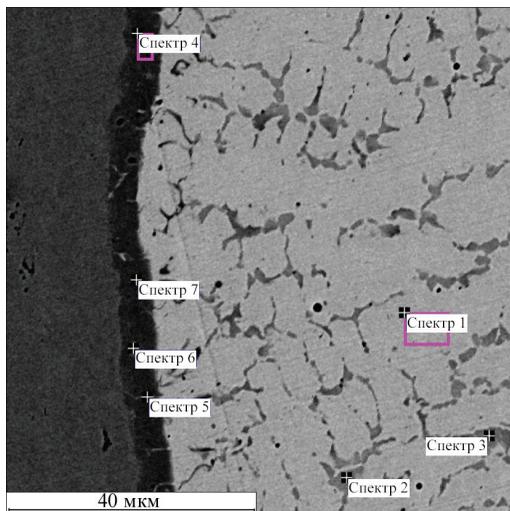


Рис. 5. Межфазная граница соединения, выполненного припоем системы Cu–Mn–Ni–3Si при использовании плазменно-дугового нагрева

Таблица 2. Химический состав структурных составляющих паяного шва

Спектр	Химический состав, мас. %				
	Si	Mn	Fe	Ni	Cu
1	1,38	13,05	0,64	0,62	84,31
2	7,93	31,16	1,02	2,11	57,77
3	8,45	31,44	1,73	4,76	53,61
4	12,68	15,70	66,73	2,20	2,69
5	12,20	15,35	62,80	2,08	7,57
6	10,32	13,58	54,98	1,95	19,16
7	13,08	15,92	67,06	2,15	1,80

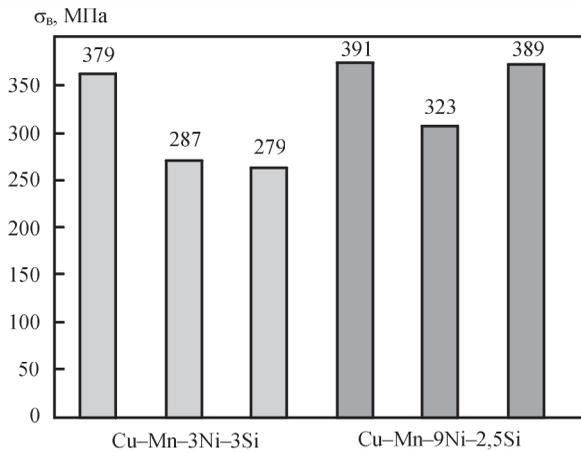


Рис. 6. Прочность на разрыв паяных стыковых образцов углеродистой стали 08кп

ют примерно 93 % прочности основного металла (315 МПа). Увеличение содержания никеля в припое до 9 мас. % обеспечивает более высокие и стабильные показатели прочности (рис. 6). Образцы разрушаются по основному металлу в зоне термического влияния, средние значения прочности на разрыв повышаются до 367 МПа.

На основании полученных результатов можно сделать выбор в пользу второго припоя, который обеспечивает более высокие показатели прочности и степень стабильности данных.

### Выводы

Исследованы сплавы системы Cu-Mn-Ni-Si с разным содержанием никеля и кремния, определены интервалы плавления и показано, что снижение температуры ликвидуса примерно на 56 °C (899 °C) обеспечивает уменьшение концентрации никеля до 3 %.

Установлено, что при легировании припоев системы Cu-Mn-Ni кремнием увеличивается площадь растекания. Оптимальная концентрация кремния не превышает 3 мас. %. В структуре паяного шва преобладают дендриты твёрдого раствора на основе

меди и марганца, по границам которых располагается фаза с более высокой массовой долей марганца (31 %) и кремния (около 8 %). Вдоль межфазной границы припой-основной металл формируется силицид на основе железа, содержащий марганец и кремний, причём содержание последнего составляет 10,32...13,08 мас. %.

Установлено, что повышение содержания никеля в припое (до 9 %) способствует повышению показателей прочности и их стабильности. При этом разрушение происходит по основному металлу в зоне термического влияния, средние значения прочности на разрыв паяных соединений составляют 367 МПа, что находится на уровне прочности основного металла.

### Список литературы/References

- Knopp N., Killing R. (2003) Hartlöten verzinkter Feinbleche mit dem Lichtbogen – sicher und wirtschaftlich (Teil 1). Solingen. *Der Praktiker*, **12**, 366–371.
- Füssel U., Schetzsche V., Sziesb U., Husner J. (2002) Plasmalöten vit stromführendem Zusatzwerkstoff. *Der Praktiker*, **10**, 336–340.
- Kallabis M., Schwankhart G. (2002) Plazmatron-Technologie im Karosserieban. *Blech Rohre Profile*, **4**, 42–45.
- Pugh C. (1970) Die Verwendung von Ni-Mn-Lotes für Plattierlotungen sowie das Verfahren zum Herstellen eines solchen Lotes. FRG, Pat. 1284262.
- Zhang Q. K., Pei Yinyin, Weimin Long (2013) *Investigations on formation mechanisms of brazing cracks at the austenitic stainless steel/filler metal brazing joint interfaces*. Acta Metallurgica Sinica – Chinese Edition, 49(10), 1177–1184 October 2013, DOI: 10.3724/SP.J.1037.2013.00219
- Davis J.R. (Ed.) *ASM Specialty Handbook. Copper and Copper Alloys*, 276–302. DOI: 10.1361/caca P276.
- Sejč P., Kubiček R. (2015) *MIG brazing of 304L type stainless steel using CuSi<sub>3</sub> and CuSi<sub>3</sub>MnAl brazing wire*. Kovove Mater., 53, 365–375, DOI: 10.4149/km 2015 5 365.
- Jyrki Miettinen. *Thermodynamic description of the Cu-Mn-Ni system at the Cu-Ni side*. (2003) Calphad 27(2), 147–152 June 2003, DOI: 10.1016/j.calphad.2003.08.003.
- (1997) Лякишев Н.П. (ред.) *Диаграммы состояния двойных металлических систем*: Справочник: в 3 т. Т.2. Москва, Машиностроение. (1997) *State diagrams of binary metallic systems*. Ed. by N.P. Lyakishev. In: Refer. book, 3 Vol., Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

## ПЛАЗМОВО-ДУГОВЕ ПАЯННЯ СТАЛІ 08кп ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРИПОЇВ СИСТЕМИ Cu-Mn-Ni-Si

С.В. Максимова, І.В. Зволінський

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Наведено результати високотемпературного диференційного термічного аналізу припоїв на базі системи Cu-Mn-Ni-Si, металографічні дослідження паяних з'єднань сталі 08кп, що отримані з використанням плазово-дугового нагріву. Показано, що при легуванні системи Cu-Mn-Ni кремнієм знижується температура плавлення сплаву і підвищується змочування основного металу. Мікрорентгеноспектральним аналізом визначено, що паяний шов з'єднань сталі 08кп складається з твердого розчину на основі міді та дисперсних виділень фази, які збагачені кремнієм. На міжфазній границі припій-основний метал у вигляді тонкої смуги (уздовж паяного шва) формується фаза на основі заліза, що містить підвищену концентрацію кремнію та марганцю, що свідчить про утворення складних силицидів. Міцність паяних з'єднань підвищується зі збільшенням концентрації нікелю в сплаві і становить 367 МПа (середнє значення). Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: плазово-дугове паяння, припій, мікроструктура, розтікання, температура солідусу і ліквідусу, міцність

BRAZE ALLOYS OF Cu-Mn-Ni-Si SYSTEM AND PLASMA-ARC BRAZING OF 08KP(BOILING) STEEL

S.V. Maksymova, I.V. Zvolinskyy

E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@isi@nas.ua

The paper presents the results of high-temperature differential thermal analysis of braze alloys based on Cu-Mn-Ni-Si system, metallographic examination of brazed joints of 08kp (boiling) steel, made with application of plasma-arc heating. It is shown that at silicon alloying of Cu-Mn-Ni system the alloy melting temperature decreases and its wetting ability increases. X-Ray microanalysis revealed that brazed seam of 08kp (boiling) steel joints consists of copper-based solid solution and dispersed precipitates of a silicon-enriched phase. An iron-based phase with higher concentration of silicon and manganese forms on braze alloy – base metal interphase as a thin band (along the brazed seam), that is indicative of appearance of silicides of a complex composition. Brazed joint strength becomes higher with increase of nickel concentration in the alloy and is equal to 367 MPa. 9 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: plasma-arc brazing, braze alloy, microstructure, spreading, solidus and liquidus temperature, strength

Поступила в редакцию 22.04.2019

# XVIII МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2019

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

<b>МЕТАЛО-ОБРОБКА</b>	<b>УКРЗВАРЮВАННЯ</b>	<b>УКРВТОР ТЕКСТ</b>	<b>УКПРОМ АВТОМАТИЗАЦІЯ</b>	<b>БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА</b>
<b>ГІДРАВЛІКА ПНЕВМАТИКА</b>	<b>ПІДШИПНИКИ</b>	<b>УКРАЇНСТВО</b>	<b>ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ</b>	<b>ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНЕ СКЛАДСЬКЕ ОБЛАДНАННЯ</b>

**ОРГАНІЗАТОР:**  
Міжнародний виставковий центр

Генеральний інформаційний партнер: 	Ексклюзивний медіа партнер: ЖУРНАЛ ГОЛОВНОГО ІНЖЕНЕРА	Технічний партнер: 
--	--	------------------------

19-22  
ЛИСТОПАДА

	+38 044 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58 e-mail: alexk@iec-expo.com.ua www.iec-expo.com.ua, www.mvc.укр www.tech-expo.com.ua	<b>МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР</b> Україна, Київ, Броварський пр-т, 15 "Лівобережна"
--	--	--