

ОСОБЛИВОСТІ ЗВАРЮВАННЯ НЕПЛАВКИМ
ЕЛЕКТРОДОМ МІДІ МАЛИХ ТОВЩИН

А.М. Бондаренко, Є.П. Лук’яненко, Т.Б. Майданчук, Д.М. Степченко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: pw1_37@ukr.net

Вироби із тонколистової міді знаходять широке застосування в радіоелектроніці, приладобудуванні, енергетиці та ін. У статті розглянуто мікроплазмове, TIG-зварювання в аргоні та гелії міді товщиною 0,2 мм. В результаті проведених досліджень встановлено, що при застосуванні в якості захисного газу гелію, підвищується швидкість зварювання більше ніж у 2 рази в порівнянні з мікроплазмовим процесом та в майже в 5 разів в порівнянні з TIG-зварюванням в аргоні. При цьому ширина зварного шва та ЗТВ зменшуються та становлять 1,4...1,6 й 1,0...1,5 мм відповідно. Проведені металографічні дослідження зварних швів не виявили дефектів у вигляді пор, тріщин, несплавлень. Мікроструктура шва представляє собою сукупність рівновісних кристалітів з розміром зерна 4...8 мкм без чітко вираженої направленості кристалізації та плавним переходом лінії сплавлення. Визначено механічні властивості зварних з’єднань: тимчасовий опір та мікротвердість. Бібліогр. 8, рис. 7, табл. 2.

Ключові слова: тонколистова мідь, мікроплазмове зварювання, TIG-зварювання, аргон, гелій, мікроструктура, механічні властивості

Вступ. Значний прогрес електротехніки та енергетики передбачає безперервний розвиток процесів зварювання для досягнення все більш нових і складних вимог, які висувають до зварного з’єднання. Використання тонких металів дозволяє зменшити габарити, вагу деталей, а особливо собівартість. Це особливо важливо при використанні такого дефіцитного матеріалу як мідь.

Для зварювання тонколистової міді використовують: контактне, електронно-променеве, ультразвукове зварювання [1–3]. Однак більш широке застосування знаходить дугове зварювання неплавким (вольфрамовим) електродом в інертних газах – аргоні та гелії [3–5].

Автори статей [3, 4] встановили, що при зварюванні тонколистових металів (менше 1,0 мм) перевага надається мікроплазмовим процесам. У порівнянні зі звичайним дуговим зварюванням вольфрамовим електродом він має дві основні переваги: концентроване введення тепла у виріб за рахунок стискання стовпа дуги та більш високу стабільність дуги, особливо на струмах менше 10 А. Однак при зварюванні металу товщиною 0,2...0,5 мм слід враховувати той факт, що стиснена (плазмова) дуга має більш сильний, у порівнянні із вільною дугою, динамічний тиск на метал зварювальної ванни, що суттєво підвищує вірогідність пропалювання.

Проаналізовані літературні дані свідчать, що дугове зварювання міді та її сплавів товщиною менше 0,5 мм вивчені недостатньо. Тому було проведено дослідження по вибору оптимальної технології малоамперного зварювання неплавким електродом із застосуванням в якості захисного газу аргону та гелію.

Методика проведення експериментів. Для експериментальних робіт використовували зразки розміром 15×60×0,2 мм із міді марки М1р [6] (див. табл. 1).

Зварювання виконувалось плазмотроном ОБ1213, постійним струмом прямої полярності від зварювального джерела МПУ-4. Технологічні схеми зварювання показані на рис. 1. В якості захисного середовища використовували гази аргон (сорт 1, ДСТУ10157-79) та гелій (стиснений марки А, ТУ 940-80). У всіх випадках використовували лантанований вольфрамовий електрод діаметром 1,5 мм. Довжина дуги витримувалась постійною – 1,2 мм.

Перед зварюванням кромки основного металу знежирювалися в органічних розчинниках (ацетон, метиловий спирт).

В процесі зварювання відбувався контроль зварювального струму, напруги на дузі та швидкості зварювання. Витрата захисного газу регулюва-

Таблиця 1. Хімічний склад міді М1р [6]

Хімічний склад, мас. %											
Cu+Ag, не більше	Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	O	Sb	Bi	Sn	P
99,9	0,005	0,002	0,004	0,002	0,005	0,005	0,01	0,002	0,001	0,002	0,012

Бондаренко А.М. – <https://orcid.org/0000-0003-0506-4444>, Лук’яненко Є.П. – <https://orcid.org/0000-0001-7678-5965>, Майданчук Т.Б. – <https://orcid.org/0000-0002-2826-8514>, Степченко Д.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9191-5780>
© А.М. Бондаренко, Є.П. Лук’яненко, Т.Б. Майданчук, Д.М. Степченко, 2024

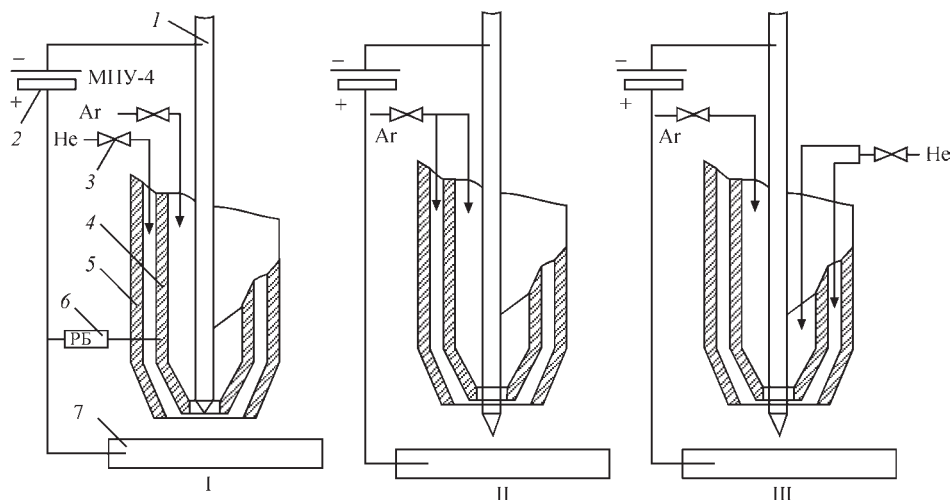


Рис. 1. Технологічні схеми зварювання: I – мікроплазмове зварювання; II – TIG-зварювання в аргоні; III – TIG-зварювання в гелії. Позначення: 1 – вольфрамовий електрод; 2 – джерело зварювання; 3 – редуктор подачі газу; 4 – внутрішнє водоохолоджуване сопло; 5 – зовнішнє сопло; 6 – реостат баластний РБ 300; 7 – виріб/зразок

лась редуктором-витратоміром АР40КР-1 та АР-40КР-1М та ротаметрами РМА-1 із пропускною здатністю 0,2...0,5 л/хв; для захисного – 2...4 л/хв.

Геометричні розміри зварних швів вимірювалися за шкалою мікроскопа МБС-2 при чотирикратному збільшенні (ціна розподілу шкали 0,025 мм). Металографічні дослідження проводили на мікрошліфах зварних швів, а їх характеристики міцності визначалися механічними випробуваннями. Візуально визначалась наявність пор, підрізів при п'яти-семикратному збільшенні на мікроскопі МИМ-7. Дослідження мікроструктури проводили методами оптичної мікроскопії (мікроскоп Neophot-32, Японія) зі збільшенням $\times 90$, $\times 140$, $\times 200$ та $\times 400$.

Дослідне обладнання. Основна мета розробки обладнання для проведення досліджень полягала в можливості одностороннього автоматичного зварювання без присадного матеріалу. Даний спосіб найбільш перспективний для зварювання тонколистових металів, коли неможливо застосувати інші види з'єднання.

Зварювання виконувалося на спеціальній підкладці, що забезпечує мінімальне тепловідведення (рис. 2). Пристосування представляє собою пластину з немагнітної сталі розмірами $6 \times 100 \times 200$ мм, паралельно поздовжньої осі з двох сторін якої профрезеровані пази глибиною 2 мм і шириною 6 мм. По осі пазів з кроком 5 мм просвердлені наскрізні отвори 2 мм. Нижній паз закривається герметичною кришкою та служить каналом підведення захисного газу до кореня шва через отвір у торці пластини. Для зниження тепловідведення від зразка на верхній поверхні вздовж паза виконані поздовжні надрізи завглибшки 1 мм з кроком 1 мм. З цією ж метою притискні планки виготовлені зі

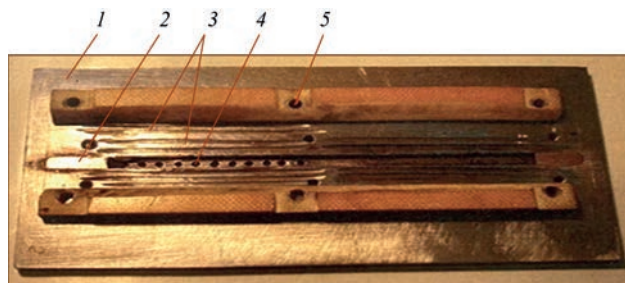


Рис. 2. Спеціальне пристосування для фіксації: 1 – пластина з нержавіючої сталі; 2 – мідна вставка для збудження дуги на початку зварювання; 3 – поздовжні пази для зниження тепловідводу від зразка який зварюється; 4 – поздовжній паз з отворами для піддуву аргону до кореня шва; 5 – текстолітові притискні губки для закріплення зразка

склотекстоліту. На початок та кінець паза запресовані мідні вставки.

На вставки укладається передня кромка зразка для запобігання пропалювання в момент торкання дуги. На ній також виконується запалювання та стабілізація дуги.

Отримані результати.

Використання технологічної схеми зварювання II.

Встановлено, що при TIG-зварюванні в аргоні стабільне проплавлення зразків товщиною 0,2 мм дугою, яка вільно горить в аргоні, можливе на струмах 20...25 А та швидкостях не більше 16 м/год при $U_d = 12...13$ В. Зовнішній вигляд виконаних швів представлено на рис. 3. Ширина шва з лицьової сторони 2,0...3,0 мм, з зворотної – 1,5...2,0 мм.

При цьому видно, що при зміні зварювального струму від 20 до 24 А при постійних параметрах струму та напруги проплавлення нерівномірне по протяжності зразка. При цьому ширина шва змінюється в межах 1,5...2,3 мм. Подальше збільшення струму (більше 26 А) призводить до пропалювання металу (рис. 3). Аналогічна картина

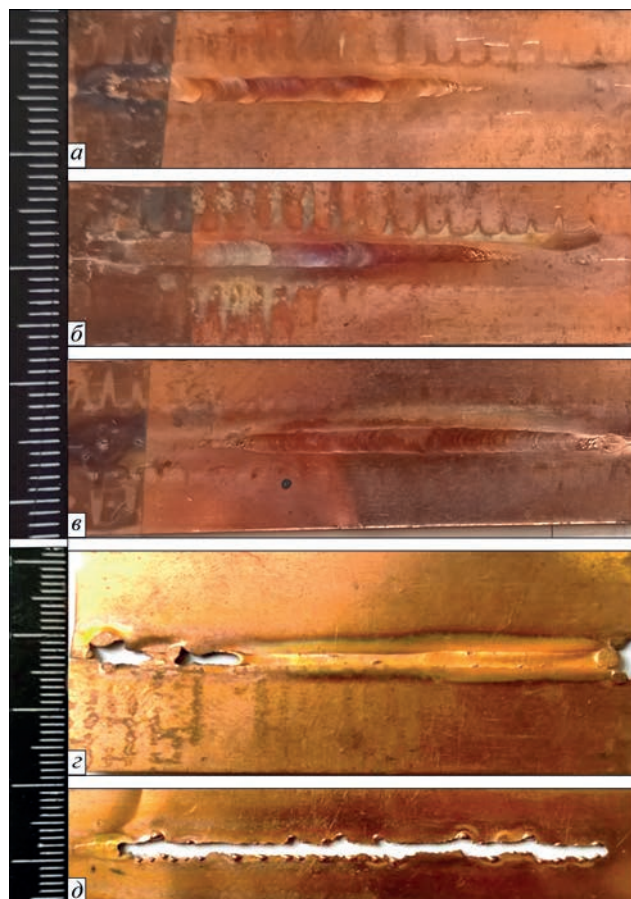


Рис. 3. Зовнішній вигляд зварних швів виконаних по технологічній схемі зварювання II при $I_{зв}$, А: а – 20; б – 22; в – 24; г – 27; д – 30

складається при підвищенні швидкості зварювання (струм та напруга – постійні величини). Також помічено, що по протяжності швів зі зворотної сторони, інколи відсутній провар.

Використання технологічної схеми зварювання I.

В режимі мікроплазмового зварювання (схема I) в якості плазмоутворюючого газу використовувався аргон з витратою 0,5 л/хв. Через баластний реостат РБ300 між соплом та електродом запалювалась чергова дуга $I_{\text{ч}} = 3,0$ А. Потім включалась подача захисного газу гелію, і при переході дуги на зразок встановлювався робочий режим $I_{\text{зв}} = 20$ А, $U_{\text{д}} = 15$ В. Максимальна швидкість зварювання, при якій забезпечувалось повне і рівномірне проплавлення, сягала 36 м/год. Слід зазначити, що в даному випадку зміна витрати захисного газу (гелію) не впливала на параметри дуги. Тим не менше перевага мікроплазмового процесу у порівнянні з TIG-зварюванням в аргоні очевидна через можливість виконання процесу на менших значеннях струму (20 А) і більших швидкостях зварювання (до 40 м/год). Зовнішній вигляд швів показано на рис. 4. При цьому геометричні розміри зварних швів однакові як з лицевої так і з зворотної сторони шва.



Рис. 4. Зовнішній вигляд зварних швів, виконаних по технологічній схемі зварювання I при $I_{\text{зв}}$, А: а – 20; б – 22; в – 24

Використання технологічної схеми зварювання III.

В практиці зварювання металів з високою теплопровідністю в якості захисного газу раціонально використовувати гелій або його суміші з аргонем [8], а також суміш аргону з воднем [5], що пов'язано з більш високою енергією гелієвої плазми у порівнянні з аргоновою. Особливо це стосується міді та її сплавів товщиною металу більше 5 мм [7, 8].

Через більш високі значення потенціалу іонізації гелію у порівнянні з аргонем запалювання дуги в гелії ускладнене. Тому процес виконувався за наступною схемою: в осьовий канал первинно подавався аргон з витратою 0,3...0,5 л/хв і запалювалась дуга на встановлених вихідних параметрах: $I_{\text{зв}} = 15$ А, $U_{\text{д}} = 12$ В. Потім в осьовий та кільцевий канали подавався гелій, а подача аргону вимикалась. При цьому напруга на дузі зростала до 25...26 В. Далі виконувалось зварювання.

Слід зазначити, що витрати гелію при подачі у внутрішній (осьовий) канал не повинні перевищувати 0,5 л/хв, інакше відбувається різання зразка. Подача гелію у кільцевий канал – не більше 5 л/хв. За такою схемою на режимах $I_{\text{зв}} = 15$ А, $U_{\text{д}} = 28$ В максимальна швидкість зварювання складала 70...75 м/год, що перевищує показники мікроплазмового зварювання більше ніж у 2 рази. Зовнішній вигляд швів показано на рис. 5.



Рис. 5. Зовнішній вигляд зварних швів виконаних по технологічній схемі зварювання III при $V_{\text{зв}}$, м/год: а – 58; б – 70

Таблиця 2. Оптимальні режими зварювання із використанням різних процесів зварювання та розміри зварних з’єднань

Процес	Струм зварювання, А	Напруга, В	Швидкість зварювання, м/год	Середня ширина шва, мм	Середня ширина ЗТВ, мм
TIG зварювання в аргоні	25	8...10	15...16	2,0...3,0	2,0...2,5
Мікроплазмове зварювання в аргоні	20	12...15	35...36	2,0...2,5	1,5...2,0
TIG зварювання в гелії	15	25...26	70...72	1,4...1,6	1,0...1,5

В результаті проведених експериментів визначено оптимальні режими зварювання міді товщиною 0,2 мм для досліджуваних процесів (табл. 2).

Як видно з табл. 2, швидкість зварювання міді товщиною 0,2 мм підвищується в 2 рази при використанні мікроплазмового зварювання та майже в 5 разів вища при застосуванні TIG зварювання в гелії в порівнянні з TIG зварюванням в аргоні. Збільшення швидкості зварювання призводить до звуження зварного шва з 2,0...3,0 до 1,4...1,6 мм, а також зменшення ЗТВ з 2,0...2,5 до 1,0...1,5 мм.

Структура металу шва та ЗТВ досліджувалась на мікрошліфах поперечного перерізу (рис. 6). Як і на металі великих товщин, в зварних з’єднаннях міді товщиною 0,2 мм виявляються характерні зони: лита структура металу шва та зона рекристалізації. Особливістю макроструктури металу шва є наступне:

- конфігурація поперечного перерізу шва наближається до прямокутної форми;
- відсутня чітка межа між металом шва та зоною термічного впливу;
- кристаліти металу шва не мають чіткої орієнтації по ізотермам кристалізації.

Мікроструктура шва представляє собою сукупність рівновісних кристалітів з розміром зерна 4...8 мкм без чітко вираженої направленості кристалізації. Зона термічного впливу (зона рекристалізації) прослідковується в межах 1,0...1,5 мм. Чіткої межі лінії сплавлення не спостерігається. Розміри рівновісних зерен по мірі віддалення від осі шва зменшуються до 1...2 мкм.

При зварюванні в аргоні і гелії у швах однакової ширини не виявлено відмінностей в структурі. Дефектів в зварних швах у вигляді пор і тріщин не виявлено.

Мікротвердість металу шва і ЗТВ практично однакова – 693...695 МПа (при мікротвердості основного металу 932...958 МПа).



Рис. 6. Мікроструктура зварного з’єднання міді $\delta = 0,2$ мм, виконаного за технологічною схемою III

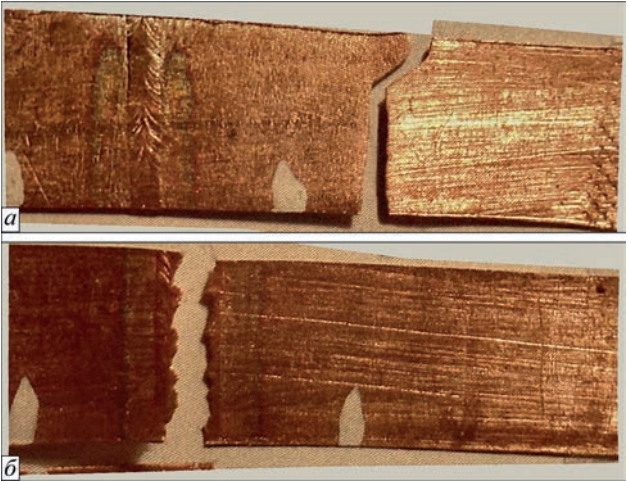


Рис. 7. Характер механічних руйнувань зварних з’єднань після механічних випробувань на розрив: а – по основному металу; б – по лінії сплавлення зварного шва з основним металом

Визначення механічних властивостей зварних з’єднань випробуванням на розрив (по 3 зразки зварених на оптимальних режимах на трьох досліджуваних технологічних схемах зварювання) показали, що тимчасовий опір розриву, у всіх досліджуваних зразках варіюється в межах – 172,0...182,6 МПа для основного металу та 154,6...165,9 МПа для зварного з’єднання. Руйнування відбувалося як по основному металу, так і по лінії з’єднання металу шва з основним металом. На рис. 7 показано характер руйнувань зразків при механічних випробувань на розрив. Слід відмітити, що характер руйнувань зразків однако-вий для всіх трьох досліджуваних технологічних схем зварювання. При цьому руйнування по лінії з’єднання металу шва з основним металом частіше відбувалось при аргонодуговому TIG-зварюванні, що пов’язано, на наш погляд, із перегрівом ЗТВ зварних швів та збільшенням її розмірів, про що свідчать дані табл. 2.

Висновки

Були проведені експерименти по зварюванню міді марки М1р товщиною 0,2 мм із застосуванням трьох технологічних схем зварювання.

Проведені дослідження показали, що при дуговому зварюванні тонколистового металу міді (товщиною 0,2 мм) слід віддавати перевагу використанню TIG-зварюванню в захисному газі – гелії.

Встановлено, що при застосуванні ТІГ-зварювання в гелії суттєво знижується величина зварювального струму (15 А) у порівнянні з мікроплазмовим зварюванням в аргоні (20 А) та ТІГ-зварюванням в аргоні (25 А). При цьому швидкість зварювання становить 70...72 м/год, що більше ніж у 2 рази в порівнянні з мікроплазмовим зварюванням та майже в 5 разів – з ТІГ-зварюванням в аргоні. Це призводить до зменшення ширини зварного шва та ширини ЗТВ. При ТІГ-зварюванні в гелії, на оптимальних режимах зварювання, ширина зварного шва становить 1,4...1,6 мм, ширина ЗТВ 1,0...1,5 мм. Слід також відмітити, що при гелієводуговому зварюванні знижується ймовірність пропалювання і досягається більш рівномірна геометрія зварного шва.

Визначено, що мікротвердість металу шва і ЗТВ практично однакова – 693...695 МПа. Мікротвердість основного металу становить 932...958 МПа. Тимчасовий опір розриву основного металу – 172,0...182,6 МПа; зварного з'єднання – 154,6...165,9 МПа.

Список літератури

1. Nunes, Faes, R., Meester, R.K., De Waele, S., Kubit, W., Andrzej (2022) Influence of welding parameters and surface preparation on thin copper-copper sheets welded by ultrasonic welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123, 1–16. Doi: 10.1007/s00170-022-10164-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10164-9>
2. Le Jeune Road, N.W. (1997) *Welding cooper and cooper alloys*. Miami: American welding society.

3. Патон Б.Е., Гвоздецкий В.С., Дудко Д.А. (1979) *Микроплазмовое зварювання*. Київ, Наукова думка.
4. Golański, D., Chmielewski, T.M., Skowrońska, B., Rochalski, D. (2018) Advanced Applications of Microplasma Welding. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 5, 53–63. DOI: <https://doi.org/10.17729/ebis.2018.5/5>
5. Шнайдер Б.И., Погребницкий Д.М. (1973) О применении аргонводородной смеси при сварке сплавов на основе палладия. *Автоматическая сварка*, 1, 54–56.
6. ДСТУ ГОСТ 859:2003 Медь. Марки (ГОСТ 859-2001, IDT).
7. Гуревич С.М. (1990) *Справочник по сварке цветных металлов*. Киев, Наукова думка.
8. Ілюшенко В.М., Лукьянченко Е.П. (2013) *Сварка и наплавка меди и медных сплавов*. Киев, Международная ассоциация «Сварка».

References

1. Nunes, Faes, R., Meester, R.K., De Waele, S., Kubit, W., Andrzej (2022) Influence of welding parameters and surface preparation on thin copper-copper sheets welded by ultrasonic welding process. *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 123, 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10164-9>.
2. Le Jeune Road, N.W. (1997) *Welding cooper and cooper alloys*. Miami:AWS.
3. Paton, B.E., Gvozdetzky, V.S., Dudko, D.A. (1979) *Microplasma welding*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
4. Golański, D., Chmielewski, T.M., Skowrońska, B., Rochalski, D. (2018) Advanced Applications of Microplasma Welding. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 5, 53–63. DOI: <https://doi.org/10.17729/ebis.2018.5/5>
5. Shnajder, B.I., Pogrebitsky, D.M. (1973) On application of argon-hydrogen mixture in welding of palladium-based alloys. *Avtomatich. Svarka*, 1, 54–56 [in Russian].
6. DSTU GOST 859:2003 Copper. Grades GOST 859-2001, IDT).
7. Gurevich, S.M. (1990) *Handbook on welding of nonferrous metals*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
8. Ilyushenko, V.M., Lukyanchenko, E.P. (2013) *Welding and surfacing of copper and copper alloys*. Kyiv, IAW [in Russian].

SOME FEATURES OF NON-CONSUMABLE ELECTRODE WELDING OF COPPER OF SMALL THICKNESSES

A.M. Bondarenko, E.P. Lukyanchenko, T.B. Maidanchuk, D.M. Stepchenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: pw_37@ukr.net

Products of thin-sheet copper are widely used in radio electronics, instrumentation, power engineering, etc. This article considers micro-plasma and TIG welding of copper with a thickness of 0.2 mm in argon and helium. As a result of the conducted research, it was established that in case of using helium as a shielding gas, the welding speed increases by more than 2 times compared to the microplasma process and by almost 5 times compared to TIG welding in argon. At the same time, the width of the weld and heat-affected zone (HAZ) decreases to 1.4...1.6 mm and 1.0...1.5 mm, respectively. Metallographic examinations of the welds did not reveal defects such as pores, cracks or lack of fusion. The weld microstructure consists of a set of equiaxed crystallites with a grain size of 4...8 μm without clearly expressed crystallization direction and with a smooth transition of the fusion line. The mechanical properties of the welded joints such as temporary resistance and microhardness were determined. Ref. 8, Fig. 7, Tab. 2

Key words: thin-sheet copper, microplasma welding, TIG welding, argon, helium, microstructure, mechanical properties

Отримано 26.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 03.04.2024

Прийнято 20.05.2024

ЗАВТОМАТИЧНЕ
ЗВАРЮВАННЯ

<https://patonpublishinghouse.com>

Передплата доступна
у друкованому та цифровому
форматах!
Підпишіться сьогодні.