

ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ПАЯНОГО ШВА ТА ЙОГО СТРУКТУРА ПРИ ПЛАЗМОВОМУ ПАЯННІ ОЦИНКОВАНОЇ СТАЛІ

С.В. Максимова, І.В. Зволінський, В.В. Юрків

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

Представлені результати досліджень паяних з'єднань тонколистової оцинкованої сталі 08Ю, що отримані шляхом зварювання, дугового і плазмового паяння. Підтверджено, що в першому випадку відбувається розбризкування металу рідкої ванни, випаровування цинку, утворення пористості. Досліджено вплив погонної енергії на параметри паяного шва при плазмовому паянні з застосуванням припою БрКМц 3-1. З'ясовано, що збільшення величини погонної енергії призводить до зменшення висоти лицьового посилення, але сприяє збільшенню висоти зворотного посилення, що потребує збільшення кількості припою. Емпіричним шляхом встановлено величину погонної енергії в межах 520...590 Дж/см, яка забезпечує отримання стикових з'єднань оцинкованої сталі 08Ю з оптимальним розміром зворотного посилення. Мікрорентгеноспектральними дослідженнями визначено, що на даному режимі формуються якісні щільні шви зі структурою твердого розчину на основі міді з дисперсними включеннями фази на основі заліза, яка збагачена кремнієм. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: плазмове паяння, оцинкована сталь, припій, погонна енергія, параметри шва, структура

Захист від корозії різних конструкцій часто реалізується за рахунок широкого застосування оцинкованої сталі. У ряді випадків використання оцинкованої сталі пов'язано з отриманням нероз'ємних з'єднань, що викликає значні труднощі. Відомо, що цинк починає плавитись при температурі 419,58 °С, а при 907 °С – випаровується. При зварюванні, коли температура крайок основного матеріалу перевищує температуру кипіння цинку, цинкове покриття вигорає з обох сторін. Для забезпечення надійного корозійного захисту зруйнований цинковий шар необхідно відновлювати, що призводить до додаткових витрат. Окрім того, попадання цинку в рідкий метал зварювальної ванни призводить до утворення пористості, тріщин, розбризкування, неповного проплавлення і нестабільного горіння дуги [1–3].

Паяння є перспективним методом отримання з'єднань листової сталі з цинковим покриттям. На відміну від зварювання термічний вплив паяння на основний матеріал значно менший. Для отримання з'єднань оцинкованої сталі широко застосовується процес паяння плавким електродом (MIG-паяння). Замість зварювального дроту в зону з'єднання подається припій. Недоліками MIG-паяння є залежність сили струму від швидкості подачі дроту; відносно високе значення сили струму для паяння тонких листів (велике тепловкладення призводить до усадки шва і збільшення деформації) розбризкування припою, що пов'язано з випаровуванням цинку і утворення дефектів [4–8].

В якості альтернативи MIG-паянню можна використовувати процес плазмового паяння. В да-

ному випадку присадний матеріал (припій), що подається в дугу, не перебуває під напругою, що дозволяє керувати параметрами паяного шва незалежно від швидкості подачі присадного матеріалу шляхом плавного регулювання напругою і струмом. Це сприяє зменшенню тепловкладення і зони термічного впливу, а також забезпечує стабільність процесу отримання нероз'ємних з'єднань. Окрім того, більш високий тиск плазмової дуги сприяє формуванню якісного щільного з'єднання зі збереженням цілісності цинкового покриття.

Метою роботи є дослідження структури, встановлення взаємозв'язку між геометричними параметрами шва, величиною погонної енергії та величиною зазора з'єднань оцинкованої сталі, що отримані шляхом плазмового паяння з застосуванням припою БрКМц 3-1.

Матеріали і методи досліджень. Для проведення експериментів підготовлений спеціальний



Рис. 1. Стенд для дугового (плазмового) паяння

Максимова С.В. – <https://orcid.org/0000-0003-0158-5760>, Зволінський І.В. – <https://orcid.org/0000-0003-1442-7980>, Юрків В.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8440-0391>

© С.В. Максимова, І.В. Зволінський, В.В. Юрків, 2020

стенд (рис. 1), що включає апарат для аргонодугового зварювання «Master TIG MLS 2300» фірми «Kemppi», блок запалювання чергової дуги, пристрій для подачі дроту з діапазоном плавного регулювання в межах 0...130 мм/с і пристрій для переміщення пальника зі швидкістю 0...25 мм/с.

В якості припою використовували мідний сплав у вигляді дроту БрКМц 3-1 діаметром 1 мм з температурою солідусу 980 °С, ліквідусу 1020 °С [9]. Для порівняльних досліджень проводили зварювання з використанням в якості присадного матеріалу дріт марки Св08Г2С. Основний метал використовували у вигляді пластинчатих зразків оцинкованої сталі 08Ю розміром 150×60×0,8 мм.

Хімічний склад використовуваних матеріалів, мас. %:

БрКМц 3-1	2,75...3,5 Si; 1...1,5 Mn; 0,5 Zn; 0,3Fe; 0,25 Sn; 0,2 Ni; основа Cu;
сталь 08Ю	0,35 Mn; до 0,07 C; 0,02...0,07 Al; 0,03 Si; до 0,025 S; до 0,02 P; основа Fe;
Св08Г2С	1,82,1 Mn; 0,7...0,95 Si; 0,25 Ni; 0,2 Cr; 0,2Cu; 0,15 Mo; 0,05...0,11 C; 0,015 P; 0,01S; 0,008 N; основа Fe

Дослідження проводили на зразках з оцинкованої сталі, отриманих за допомогою MIG-зварювання, MIG-паяння і плазмового паяння в горизонтальному положенні. З нероз'ємних з'єднань вирізали зразки і за стандартною методикою готували мікрошліфи для металографічних досліджень.

Мікροструктуру і локальний елементний склад паяних з'єднань вивчали з використанням скануючого електронного мікроскопу TescanMira 3 LMU, який оснащений енергодисперсійним спектрометром Oxford Instruments X-max 80 mm² та програмним забезпеченням INCA. Локальний

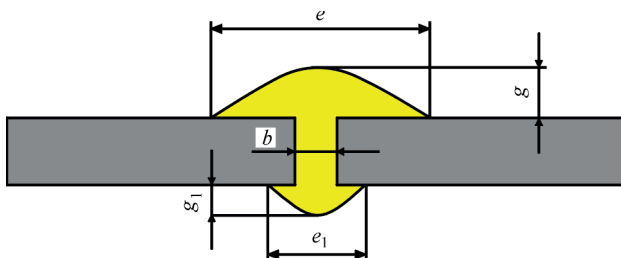


Рис. 2. Схематичне зображення параметрів паяного шва: e – ширина лицьового посилення; e_1 – ширина зворотного посилення; g – висота лицьового посилення; g_1 – висота зворотного посилення; b – величина паяльного зазору



Рис. 3. Зовнішній вигляд (а), макроструктура шва (б), отриманого MIG-зварюванням та MIG-паянням (в) оцинкованої сталі

розподіл хімічних елементів визначали в обернено-розсіяних електронах (BSE), що дозволяє досліджувати мікрошліфи без хімічного травлення.

Виміри параметрів паяних швів з'єднань оцинкованої сталі, отриманих з застосуванням плазмового паяння, проводили відповідно до схеми (рис. 2).

Величину погонної енергії розраховували за формулою

$$Q = \frac{q}{V}, \text{ Дж/см}, \quad (1)$$

де $q = \eta IU$ – ефективна теплова потужність (Дж/с); η – ефективний ККД процесу нагріву плазмою деталей в середовищі аргону (0,627); U – падіння напруги дуги (В); I – сила струму (А); V – швидкість зварювання-паяння (см/с).

Результати експериментів та їх аналіз. Зовнішній вигляд зразків оцинкованої сталі, отриманих із застосуванням MIG-зварювання (плавким електродом на зворотній полярності) показав погане формування зварних швів, утворення пористості (рис. 3, а, б), що обумовлено випаровуванням цинку з поверхні основного металу.

При MIG-паянні відбувається розбризування присадного матеріалу (через випаровування цинку), що є недоліком даного процесу (рис. 3, в).

При плазмовому паянні (рис. 4) стикових пластинчатих зразків спостерігається формування щільних паяних швів без розбризування припою (рис. 5, а), без пор і дефектів (рис. 5, б).

В автомобільній промисловості широко використовуються напускні з'єднання. Як показали експерименти, отримання напускних з'єднань потребує незначного коректування процесу паяння. Так, плазмотрон розміщується під кутом до вертикальної поверхні пластин основного металу. Оскільки вертикальне (з кутом в 90°) розміщення плазмотрона приводить до відхилення дуги в сторону верхньої пластини, на відпрацьованому режимі спостерігається хороше формування напускного з'єднання (рис. 6, а, б) з формуванням повної галтельної ділянки (рис. 6, в).

Результати досліджень впливу погонної енергії на геометричні параметри паяних швів показали, що висота зворотного посилення g_1 монотонно зростає з постійною швидкістю при збільшенні погонної енергії (рис. 7, а). Це призводить до збільшення об'єму металу зі зворотної сторони

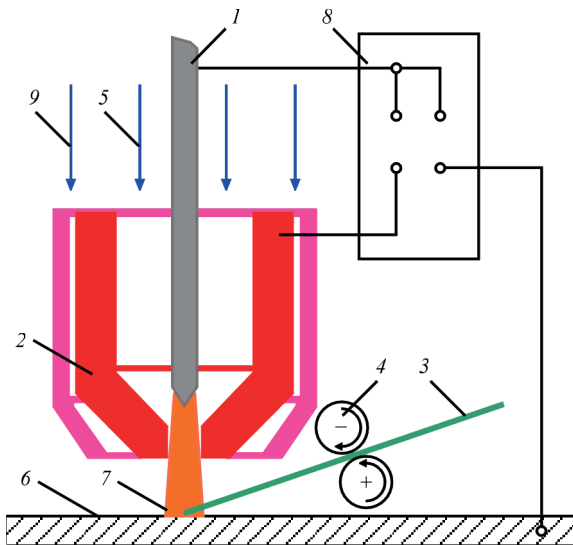


Рис. 4. Схема процесу плазмового паяння: 1 – вольфрамовий електрод; 2 – плазموутворююче сопло; 3 – припій; 4 – подаючі ролики; 5 – плазموутворюючий газ; 6 – основний метал; 7 – плазмова дуга; 8 – джерело живлення; 9 – захисний газ

шва і негативно впливає на витрати присадного матеріалу (рис. 7, *a*).

Інший характер спостерігається при дослідженні висоти лицьового посилення g , яке зменшується з підвищенням погонної енергії. В той же час ширина лицьового посилення e спочатку збільшується до 4,5 мм при погонній енергії 590...750 Дж/см, потім знижується, і починаючи з 916 Дж/см відбувається стабілізація.

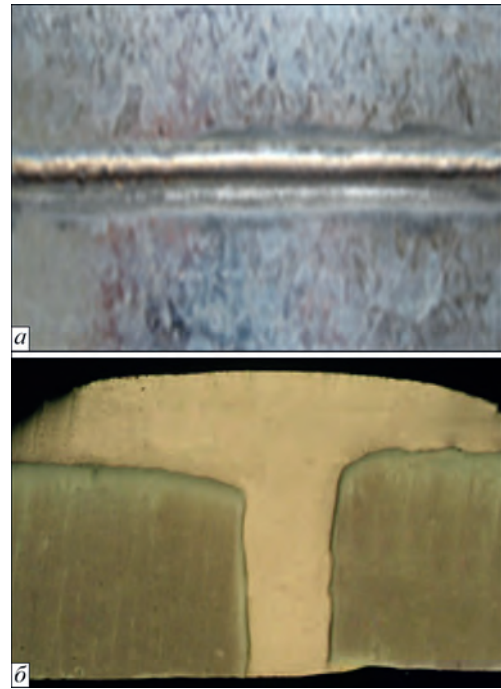


Рис. 5. Зовнішній вигляд (*a*) та макроструктура (*b*) паяного стикового з'єднання оцинкованої сталі (*b*), отриманого за застосуванням плазмового паяння

Проведені дослідження з впливу погонної енергії на формування стикових пластинчатих паяних з'єднань показують, що якісні щільні паяні шви (без дефектів) з оптимальним розміром лицьового і зворотного посилення формуються при ве-



Рис. 6. Лицьова (*a*), зворотна сторона (*b*) та макроструктура (*c*) паяного напускового з'єднання оцинкованої сталі

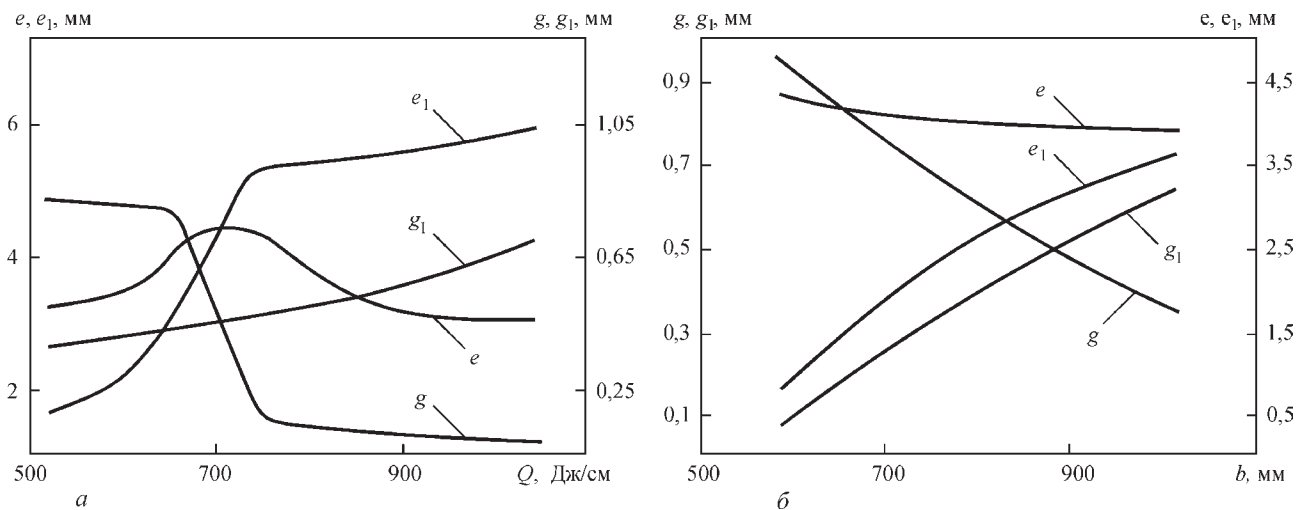


Рис. 7. Залежність параметрів паяного шва від величини погонної енергії (*a*) та величини зазору (*b*): ширина e_1 і висота g_1 зворотного посилення; ширина e та висота g лицьового посилення

личині погонної енергії, яка знаходиться в межах 520...590 Дж/см. При паянні напускних зразків величину погонної енергії необхідно коректувати з урахуванням особливостей технологічного процесу паяння і геометричних параметрів з'єднань.

При паянні без зазору (капілярне паяння) існує ймовірність часткового заповнення капілярного зазору припоєм. Проведеними дослідженнями з впливу величини зазору на формування паяних стикових з'єднань встановлено, що вона грає велику роль не тільки на формування шва, витрату присадного металу, але і на теплопередачу енергії в основний метал. Експерименти проводили з перемінним зазором в межах 0,2...0,6 мм. З отриманих результатів випливає, що при постійних параметрах режиму (I , U , V та швидкості подачі присадного матеріалу) зі збільшенням зазору ширина лицьового посилення (паяного шва) e незначно зменшується, а зворотного e_1 – стрімко збільшується (рис. 7, б). Це призводить до зменшення висоти лицьового посилення (паяного шва) g і збільшення висоти зворотного посилення g_1 . Очевидно, що з точки зору економії припою перевагами користується паяння з малими зазорами.

Отримані результати локального мікрорентгеноспектрального аналізу і вивчення хімічної неоднорідності паяних з'єднань оцинкованої сталі свідчать про те, що мікроструктура паяного шва

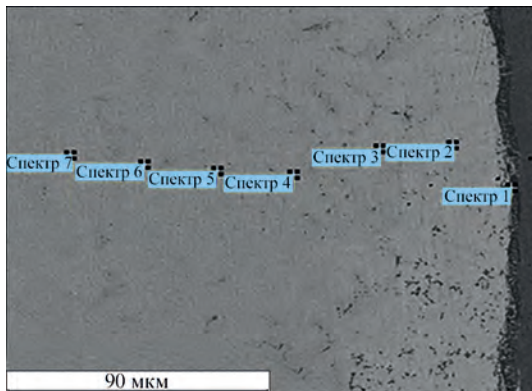


Рис. 8. Електронне зображення мікроструктури паяного з'єднання з оцинкованої сталі, що отримане з погонною енергією 567 Дж/см і зазорі 0,4 мм

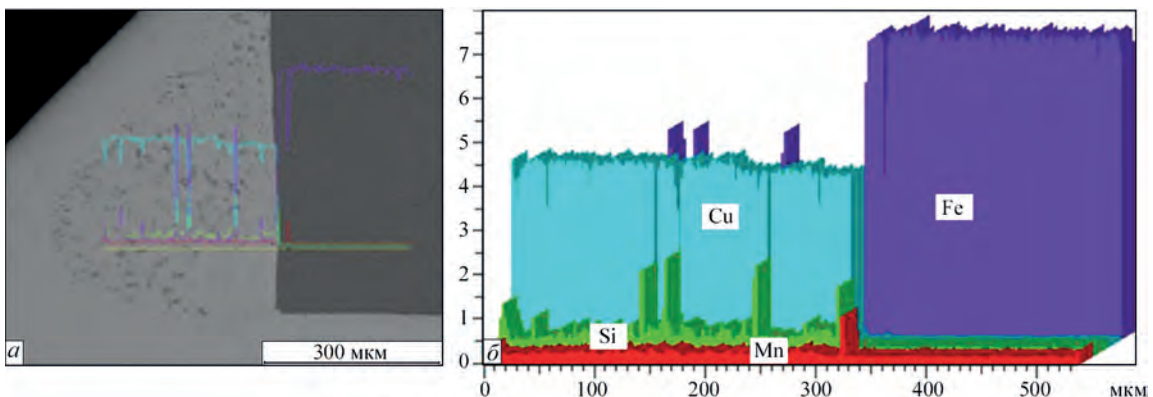


Рис. 9. Мікроструктура (а) та характеристичні спектри елементів (б) в з'єднанні, що отримано плазмовим паянням

Вміст хімічних елементів в паяному шві, мас. %

Номер спектра	Si	Mn	Fe	Cu	Zn
1	9,08	1,08	43,35	35,01	11,48
2	2,71	1,18	0,89	77,87	17,35
3	3,67	0,92	0,68	79,91	14,82
4	3,15	1,04	–	87,30	8,51
5	3,53	0,97	–	93,05	2,44
6	2,77	0,97	–	96,26	–
7	2,96	1,05	–	95,99	–

утворена твердим розчином на основі міді, по границям зерен якого виділяються дисперсні включення фази на основі заліза (43,35 мас. %), що збагачені кремнієм і містять інші складові елементи припою (рис. 8, таблиця).

На міжфазній границі основний метал – припій формується тонкий шар (1...2 мкм) фази на основі заліза, що містить 9,08 мас. % кремнію. Відповідно до бінарних діаграм стану металічних сплавів [10], в системі залізо-кремній останній характеризується низькою розчинністю і утворює силіциди, які в даному випадку виділяються у вигляді тонкого прошарку. Вони містять також до 11,48 % цинку.

Бінарна діаграма стану металічної системи мідь-цинк теж характеризується обмеженою розчинністю [10], але область розчинності цинку в міді значно більша в порівнянні з розчинністю кремнію в залізі. Тому в зернах твердого розчину на основі міді концентрація цинку збільшується до 17,35 мас. %. З віддаленням від міжфазної границі з основним металом концентрація цинку поступово знижується і на відстані 100 мкм від основного металу цинк не виявлено. Такі особливості формування паяних швів обумовлені будовою діаграм стану, присутністю концентраційного градієнту між елементами припою і основного металу та нерівноважними умовами кристалізації металу паяного шва, що призводить до протікання взаємних дифузійних процесів на міжфазній границі. Метал паяного шву насичується залізом під час паяння, що сприяє формуванню фази на основі заліза, яка збагачена кремнієм.

Характеристичні спектри, що отримані з застосуванням мікрорентгеноспектральних досліджень шляхом сканування електронним променем паяного напускного з'єднання, добре корелюють з попередніми результатами і підтверджують утворення дисперсних фаз на основі заліза (рис. 9, а, б), що збагачені кремнієм (силіцидів).

Концентрація міді в даній фазі знижується. Слід зазначити, що включення силіцидів, які спостерігаються на міжфазній границі припій–оцинкована сталь, мають підвищений вміст марганцю (рис. 9, б), що свідчить про часткове заміщення заліза марганцем і утворення складної сполуки $(\text{MnFe})_x\text{Si}_y$, кристалічна решітка якої ізоморфна решіткам фаз Mn_xSi_y і Fe_xSi_y [11]. Утворення таких фаз в паяному шві сприяє підвищенню температури розпаювання отриманого з'єднання і підвищенню температури експлуатації.

Висновки

Вивчення геометричних параметрів швів, отриманих шляхом плазмового паяння оцинкованої сталі показали, що зі збільшенням погонної енергії зростає величина зворотного посилення. Ширина лицьового посилення спочатку збільшується, а після 900 Дж/см даний параметр стабілізується.

Визначено, що збільшення ширини паяльного зазору з 0,2 до 0,6 мм сприяє зменшенню висоти лицьового посилення з 0,95 до 0,37 мм і збільшенню висоти зворотного посилення з 0,1 до 0,62 мм. Таким чином, підвищення погонної енергії і величини зазору при плазмовому паянні призводить до збільшення об'єму металу в зворотному посиленні, що негативно позначається на витраті присадного матеріалу.

Емпіричним шляхом встановлено величину погонної енергії в межах 520...590 Дж/см, яка забезпечує отримання якісних стикових з'єднань оцин-

кованої сталі 08Ю з оптимальними параметрами паяного шва.

Мікрорентгеноспектральними дослідженнями встановлено, що мікроструктура паяного шва утворена твердим розчином на основі міді та дисперсними включеннями фази на основі заліза, що збагачені кремнієм (силіциди), які виділяються у вигляді тонкого прошарку (шириною 1...2 мкм) на міжфазній границі основний метал–припій та по границям зерен твердого розчину на основі міді.

Список літератури/References

1. Killing, R. (2005) Plasma brazing – Advantages and disadvantages compared with MIG brazing. *Welding and Cutting*, 4, 3, 147–149. [in English].
2. Pavol Sejc (2010) MAG Welding of Galvanized Tin Plate in Protection Gas CO_2 and $\text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$. *Zvarac*, VII, 3, 8–13. [in Slovak].
3. Pavol, Sejc (2002) Arc welding of MAG steel sheets covered with anti-corrosion coating on zinc base. *Zvaranie-Svarovani*, 4, 3, 71–73. [in Slovak].
4. Haller, H. (2002) Metal gas inverters from galvanized steel profiles. *Der Praktiker*, 10, 377–380. [in German].
5. Wesling V., A. Shram A. Ait-Mekideche (2003) Plasma soldering of surface-coated thin sheets. *Ibid*, 7, 196–200. [in German].
6. Belkacem, Bouaifi (2003) Low – heat process enhances joining of coated sheet metals. *Welding J.*, 1, 26–30. [in English].
7. Chovet, C., Guiheux, S. (2006) Possibilities offered by MIG and TIG brazing of galvanized ultra-high strength steels for automotive applications. *La metallurgia italiana*, 7-8, 47 – 54. [in English].
8. Walduck, B. (1999) Using Plasma-brazing in car body fabrication. *Welding and Metal Fabrication*, 67, 8, 11–14. [in English].
9. Smiryagin, A.P., Smiryagin, N.A., Belova, A.V. (1974) *Industrial non-ferrous metals and alloys. Directory*. Third ed. Moscow, Metallurgy [in Russian].
10. Massalski, T.B., Okamoto, H., Subramanian, P.R., Kacprzak L. (1990). Binary Alloy Phase Diagrams. The Materials Information Society: *ASM International*, 1, 849 p.
11. Goldschmidt, X.D. (1971) *Implanted alloys*. Ed. by N.T. Chebotarev. Moscow, Mir, 56–68.

GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE BRAZED SEAM AND ITS STRUCTURE IN PLASMA BRAZING OF GALVANIZED STEEL

S.V. Maksymova, I.V. Zvolinskii, V.V. Yurkiv

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper presents the results of investigations of brazed joints of 08Yu galvanized steel, produced by welding, arc and plasma brazing. It is confirmed that in the first case, spattering of the liquid pool metal, zinc evaporation and porosity formation take place. The influence of energy input on brazed seam parameters was studied in plasma brazing with application of BrKMts 3-1 brazing filler metal. It was found that increase of energy input leads to reduction of face reinforcement height, but promotes increase of the reverse reinforcement height, that requires a greater amount of brazing filler metal. It was empirically determined that energy input value in the range of 520 – 590 J/cm ensures producing butt joints of galvanized 08Yu steel with optimum size of reverse reinforcement. X-ray microprobe analysis showed that high-quality dense welds form in this mode that have the structure of copper-based solid solution with dispersed inclusions of iron-based phase, enriched in silicon. 11 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

Keywords: plasma brazing, galvanized steel, brazing filler metal, energy input, weld parameters, structure

Надійшла до редакції
27.05.2020