

УДК 621.791.37

АНАЛІЗ ТЕРМІЧНИХ ЦИКЛІВ ПІД ЧАС ПАЯННЯ ТА ЗВАРЮВАННЯ СТАЛІ 08кп

С. В. МАКСИМОВА, І. В. ЗВОЛІНСЬКИЙ, М. О. ЧЕРВ'ЯКОВ,
В. Е. СУХОЯРСЬКИЙ, Е. В. ІВАНЧЕНКО

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

Подано результати досліджень з визначення термічних циклів під час різних методів отримання нероз'ємних з'єднань зі сталі 08кп: дуговому ТІГ зварюванні, ТІГ паянні, плазмовому паянні, ТІГ і плазмовому паянні імпульсним струмом. Аналіз експериментальних та розрахункових термічних циклів показав, що їх геометрична форма якісно збігається, але кількісно за розподілом у часі розрахункові значення дещо вищі. Встановлено, що плазмове паяння зі застосуванням імпульсного струму забезпечує мінімальне значення термічних циклів і є найефективнішим методом отримання нероз'ємних з'єднань низьковуглецевої сталі 08кп.

Ключові слова: *дугове паяння, зварювання, математичне моделювання, низьковуглецева сталь, припій, термічний цикл.*

Results of research on determining the value of thermal cycles using various methods of preparation of permanent joints made of 08kp steel: arc TIG welding, TIG brazing, plasma brazing, TIG and plasma brazing with pulsed current are presented. The analysis of the thermal curves of the cycles obtained experimentally and by calculation showed that their geometric shape coincides qualitatively, but quantitatively the calculated values are somewhat higher than the experimental ones according to the time distribution. It was established that plasma brazing with the use of pulsed current provides the minimum amount of thermal cycles and is the most effective method of obtaining permanent joints of low carbon 08 kp steel.

Keywords: *arc brazing, welding, mathematical modeling, low carbon steel, filler metal brazing, thermal cycle.*

Вступ. На сьогодні паяння поряд зі зварюванням є одним з найпоширеніших способів отримання нероз'ємних з'єднань. Впродовж тривалого часу в автомобільній промисловості шукають нові процеси для заміни зварювання ТІГ для з'єднання тонких сталевих листів. Особливу увагу приділяють дуговому паянню, яке є оптимальним рішенням для автомобільної промисловості.

Широко застосовують в автомобілебудуванні конструкційну сталь 08кп для виготовлення кузовів автомобілів та інших деталей складного профілю. Вона містить малу кількість вуглецю, і, відповідно, м'який, в'язкий ферит, що сприяє холодному штампуванню [1] і належить до класу низьковуглецевих якісних сталей, які застосовують для виготовлення окремих конструкцій у багатьох галузях промисловості у вигляді листового, фасонного і сортового металопродукату. Низьковуглецеві сталі типу 08 використовують у вигляді тонких оцинкованих листів, які з'єднують дуговим паянням [2–6] – найдоступнішим методом з'єднання. Він замінює дугове зварювання завдяки деяким очевидним перевагам, а саме: зменшенню вигорання цинку під час процесу, меншим залишковим напруженням та деформаціям. Однак деякі способи дугового високотемпературного паяння, особ-

ливо дугове паяння неплавким електродом у захисних газах і плазмове, досліджені недостатньо.

Враховуючи все ширше використання дугового паяння в різних виробничих процесах, тут основну увагу приділили оптимізації дугового паяння за мінімізації введення тепла та забезпечення всіх показників якості стику. З огляду на це, практичний інтерес викликає оцінка зміни погонної енергії за переходу від дугового зварювання до дугового паяння, зокрема зі застосуванням імпульсних режимів, та її вплив на характер зміни термічних циклів під час отримання з'єднань.

Вирішальний вплив на термомеханічні та фізико-хімічні перетворення під час зварювання плавленням мають теплові процеси [7]. Від ступеня нагрівання металу та характеру розподілу теплоти у виробі залежать їх структурно-фазові перетворення [8], механічні, технологічні та експлуатаційні властивості зварних та паяних з'єднань [9]. Виникнення зварювальних напружень і деформацій також залежить від циклу нагрівання та охолодження виробу. Отже, майже всі процеси, які відбуваються у металах під час зварювання та паяння, залежать від їх термічних циклів [10–13]. У цьому випадку інформація про поширення тепла в основному металі під час TIG зварювання, TIG та плазмowego паяння дає змогу судити про правильність вибору режимів, а також про залишкові напруження, які виникають у зварних та паяних конструкціях.

Мета роботи – дослідити термічні цикли під час отримання нероз'ємних з'єднань тонколистової низьковуглецевої сталі 08кп експериментальним і розрахунковим способами та порівняти теплові процеси під час TIG зварювання, TIG і плазмowego паяння, зокрема зі застосуванням імпульсного струму.

Матеріали та методи досліджень. Досліджували на пластинах зі сталі 08кп [14] розміром 0,15×0,06×0,001 м. Хімічний склад експериментальних матеріалів поданий у табл. 1.

Таблиця 1. Хімічний склад матеріалів, wt%

Марка	Fe	Cu	C	Si	Mn	Ni	Cr	Zn	Sn	S	P	Pb
08кп	осн.	до 0,3	0,05... 0,12	до 0,3	0,25... 0,5	до 0,3	до 0,1	–	–	до 0,04	до 0,035	–
БрКМц3-1	до 0,3	осн.	–	2,7... 3,5	1... 1,5	до 0,2	–	до 0,5	до 0,25	–	–	до 0,3
Св08Г2С	осн.	–	0,05... 0,11	0,7... 0,95	1,8... 2,1	до 0,25	до 0,2	–	–	до 0,025	до 0,03	–

Для досліджень підготували спеціальний стенд: джерело живлення Master TIG MLS 2300 фірми “Kemppi”, блок підпалу чергової дуги, механізована установка для переміщення пальника та пристрій для подачі дроту діаметром 0,001... 0,0012 м. Як захисний газ використовували технічний аргон. Основний критерій для вибору режимів зварювання та паяння – повне проплавлення та якісне формування шва. Стикові зразки отримували дуговим (TIG) зварюванням (вольфрамовим електродом в аргоні без зазору) зі застосуванням присадного дроту Св08Г2С [15] діаметром 0,001 м, TIG паянням та плазмовим паянням з присадним дротом БрКМц3-1 [16] діаметром 0,0012 м зі зазором 0,0004 м (табл. 2).

Розраховували погонну енергію q [17] за формулою

$$q = \eta \frac{IU}{v}, \quad (1)$$

де q – погонна енергія; v – швидкість паяння та зварювання; I – струм паяння та зварювання; U – напруга дуги; η – ефективний коефіцієнт корисної дії дуги.

Таблиця 2. Режими зварювання та паяння

Метод з'єднання	Погонна енергія q , J/m	Зазор, м
TIG зварювання	81900	Без зазору
TIG паяння	48800	0,0004
TIG паяння імпульсним струмом	39400	0,0004
Плазмове паяння	32300	0,0004
Плазмове паяння імпульсним струмом	27800	0,0004

Для реєстрації термічних циклів у зоні термічного впливу застосовували термопари типу “ХА” (хромель-алюмель), оскільки їх верхня межа робочого діапазону вимірюваних температур становить 1250°C. Термічні цикли вимірювали на поверхні пластини на відстані $x = 0,055$ м і $y = 0,006$ м (1), $x = 0,065$ м і $y = 0,007$ м (2), $x = 0,075$ м і $y = 0,008$ м (3), $x = 0,085$ м і $y = 0,009$ м (4), $x = 0,095$ м і $y = 0,010$ м (5) (рис. 1а). На перетині розмічувальних ліній робили поглиблення 0,0002...0,0003 м для приварювання термопар.

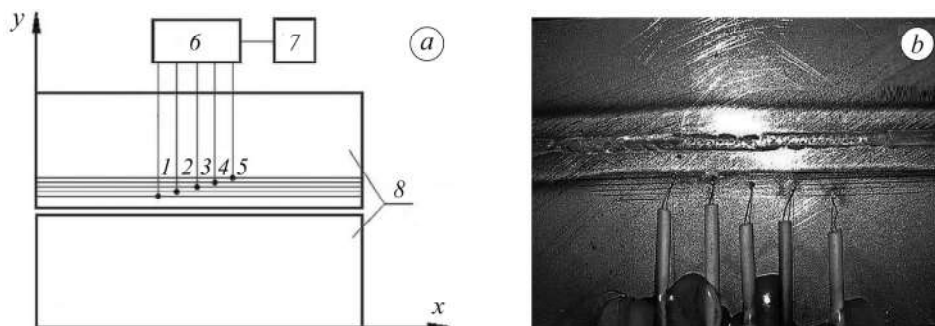


Рис. 1. Схема розміщення термопар на поверхні пластини основного металу під час вимірювання термічних циклів під час зварювання та паяння (а: 1–5 – термопари; 6 – аналого-цифровий перетворювач; 7 – комп'ютер; 8 – з'єднувальні зразки) та зовнішній вигляд зразка після паяння з привареними термопарами (b).

Fig. 1. Scheme of placement of thermocouples on the surface of the base metal plate during measurement of thermal cycles under welding and brazing (a: 1–5 – thermocouples; 6 – analog-digital converter; 7 – computer; 8 – joining samples) and external view of the sample after soldering with welded thermocouples (b).

До поверхні пластин спаї термопар кріпили конденсаторним зварюванням, що забезпечує сталий стабільний контакт. Записували термічні цикли в режимі реального часу за допомогою аналого-цифрового перетворювача EXPERT 9018P і спеціалізованого програмного забезпечення Powergraph 3.0, що дає можливість автоматично перетворювати значення термо-ЕРС (термоелектрорушійна сила) у температуру з точністю $\pm 1^\circ\text{C}$. Після зварювання та паяння шов і термопари в зоні термічного впливу фотографували на бінокулярному мікроскопі з 25-кратним збільшенням і виконували уточнювальне вимірювання відстаней від лінії сплавлення до спаїв термопар за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Для побудови температурних полів у площині пластини за дугового зварювання та паяння низьковуглецевої сталі 08кп використовували математичне моделювання.

Результати експериментів та їх обговорення. Експериментально визначені термічні цикли під час отримання нероз’ємних з’єднань зі сталі 08кп завтовшки 0,001 м порівнювали з розрахованими для аналогічних зразків.

Обчислювали за методикою М. М. Рикаліна та В. І. Махненка для схеми рухомого лінійного джерела тепла у пластині з урахуванням відбиття тепла граничними поверхнями зразка. Рівняння граничного стану поширення тепла від лінійного джерела сталої потужності, яке рухається зі сталою швидкістю по поверхні тонкої пластини, є у вигляді [18]:

$$T(r, x) - T_0 = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{Vx}{2a}\right) K_0\left(v \frac{Vr}{2a}\right), \quad (2)$$

де $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; $T(r, x)$ – температура у точці з координатами x, r ; x, y – абсциса та ордината декартової системи координат на площині з початком у джерелі зварювального нагріву; T_0 – початкова температура; Y_0 – функція Бесселя від уявного аргументу другого роду нульового порядку; q – ефективна теплова потужність джерела; λ – коефіцієнт теплопровідності; $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коефіцієнт температуро-

провідності; c – питома теплоємність основного матеріалу; ρ – густина основного матеріалу; α – коефіцієнт тепловіддачі; δ – товщина пластини; v – швидкість зварювання (паяння).

Вираз (2) не враховує теплоту, яка потрібна для плавлення присадного дроту, тому використали таке рівняння [18]:

$$q_c = v_c A_e c_p (T_m - T_{r \max}), \quad (3)$$

де q_c – тепловкладення на одиницю довжини шва за одиницю часу; v_c – швидкість плавлення присадного дроту; A_e – площа його поперечного перерізу; ρ – густина присадного дроту; c – теплоємність присадного дроту; T_m – температура плавлення присадного дроту; $T_{r \max}$ – температура резистивного нагріву.

Згідно з табличними даними (табл. 3), побудовано залежності коефіцієнтів теплопровідності λ та теплоємності c від температури для підвищення точності розрахунків (рис. 2).

Таблиця 3. Фізичні властивості сталі 08кп [19]

T , °C	λ , W/(m×°C)	ρ , kg/m ³	c , J/(kg×°C)
20	63	7871	–
100	60	7846	482
200	56	7814	498
300	51	7781	514
400	47	7745	533
500	41	7708	555
600	37	7668	584
700	34	7628	626
800	30	7598	695
900	27	7602	700
1000	–	–	695

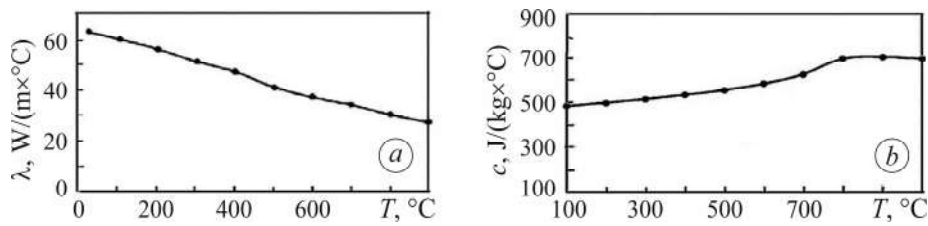


Рис. 2. Залежність коефіцієнтів теплопровідності λ (a) та теплоємності c (b) від температури для сталі 08кп.

Fig. 2. Dependence of the coefficients of thermal conductivity λ (a) and thermal capacity c (b) on temperature for 08kp steel.

Отримані експериментальні термічні цикли, які знаходяться на різній відстані від осі зварювального та паяного шва, показують пряму їх залежність від відстані до осі шва і часу нагріву (рис. 3).

Термічні цикли, які визначено на відстані $x = 0,075$ м, $y = 0,008$ м для п'яти методів отримання нероз'ємних з'єднань, порівнювали між собою (рис. 4).

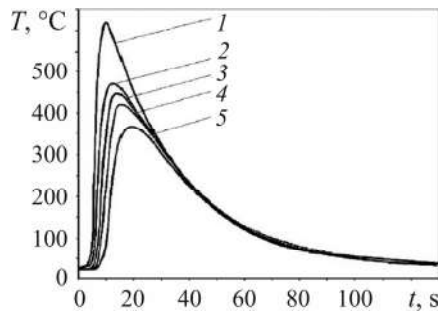


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Експериментальні термічні цикли у зоні термічного впливу (ЗТВ) під час дугового зварювання, які отримані на відстані 0,006 м (1); 0,007 м (2); 0,008 м (3); 0,009 м (4); 0,01 м (5) від осі зварювального шва.

Fig. 3. Experimental thermal cycles in the heat-affected zone (HAZ) under arc welding, obtained at a distance of 0.006 m (1); 0.007 m (2); 0.008 m (3); 0.009 m (4); 0.01 m (5) from the axis of the welded joint.

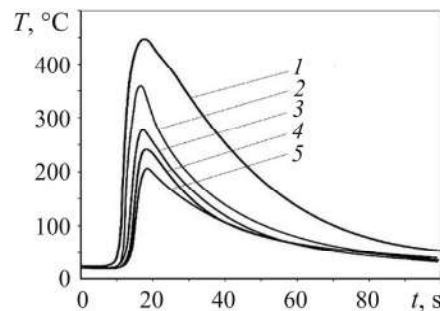


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Експериментальні термічні цикли у ЗТВ, які визначені на відстані 0,008 м від осі шва за: ТІГ зварювання (1); ТІГ паяння (2); ТІГ паяння імпульсним струмом (3); плазмового паяння (4); плазмового паяння імпульсним струмом (5).

Fig. 4. Experimental thermal cycles in the HAZ determined at a distance of 0.008 m from the joint axis with: TIG welding (1); TIG brazing (2); TIG brazing with a pulse current (3); plasma brazing (4); plasma brazing with pulse current (5).

Зовнішній вигляд отриманих нероз'ємних з'єднань після зварювання за режимом: $I = 100$ А, $U = 11...12$ В, $v = 0,0063$ м/с, швидкість подачі присадного дроту Св08Г2С 10 мм/с, $q = 81900$ Дж/м (рис. 5a, b) суттєво відрізняється від зовнішнього вигляду з'єднань, які отримані плазмовим паянням в імпульсному режимі: базовий струм 35 А, струм імпульсу 85 А, струм паузи 12 А, $U = 15,7$ В, $v = 0,0063$ м/с, частота 5 Hz, баланс 30%, швидкість подачі присадного дроту 0,006 м/с, $q = 27800$ Дж/м (рис. 5c, d).

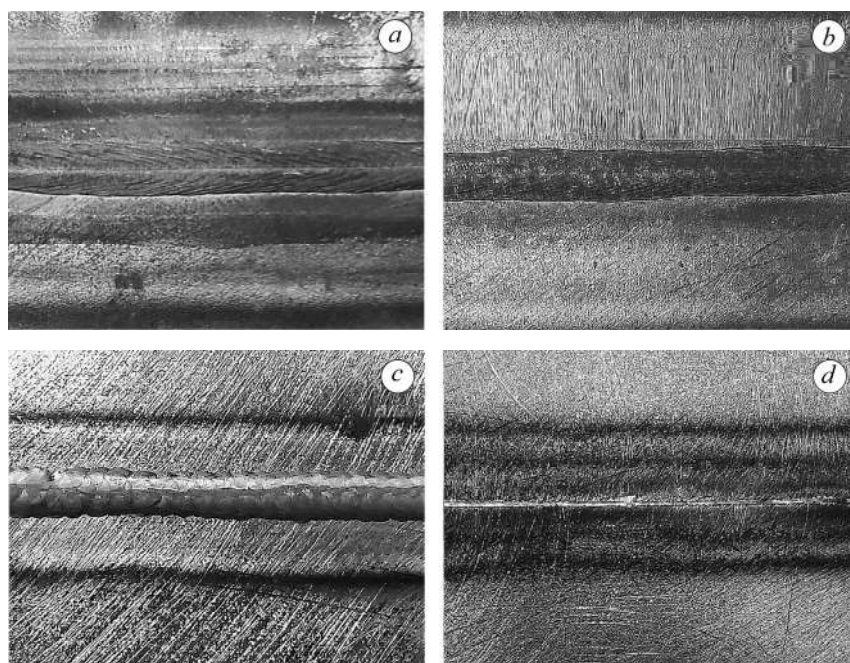


Рис. 5. Зовнішній вигляд шва з лицьової (а, с) та зворотної (b, d) сторін за TIG зварювання (a, b) та плазмового паяння в імпульсному режимі (c, d).

Fig. 5. External view of a joint from the front (a, c) and opposite (b, d) sides for TIG welding (a, b) and plasma brazing in pulse mode (c, d).

Таблиця 4. Температурне поле в зоні досліджень основного металу

Метод з'єднання	Температура, °C				
	Ізотерми на рис. 7				
	1	2	3	4	5
TIG зварювання	100	200	300	400	500
TIG паяння	100	200	300	400	–
TIG паяння імпульсним струмом	100	200	300	–	–
Плазмове паяння	100	200	250	–	–
Плазмове паяння імпульсним струмом	100	150	200	–	–

За плазмового паяння зона термічного впливу на основному металі характеризується меншими розмірами порівняно з аналогічною зоною зразка, отриманого TIG зварюванням. Згідно з результатами (табл. 4), перехід від TIG зварювання до паяння дає змогу суттєво зменшити вплив температури на основний метал, що сприятиме зниженню ймовірності дефектів та зменшенню деформацій під час утворення з'єднання. Мінімальний вплив температури на основний метал забезпечує плазмове паяння з імпульсним струмом. Розраховані термічні цикли для методів з'єднання TIG зварюванням і плазмовим паянням імпульсним струмом (на відстані 0,008 m) показують, що мінімальне значення характерне для останнього (рис. 6). Окрім того, маємо досить гарну збіжність розрахованих (за методом Рикаліна та Махненка) та експериментальних термічних циклів (похибка становить 8...10%). Ізотерми, отримані розрахунковим і експериментальним способами під час TIG зварювання, TIG паяння, TIG паяння зі застосуванням імпульсного струму, плазмового паяння та плазмового паяння імпульсним струмом (табл. 4) свід-

чать про кореляцію між TIG зварюванням та плазмовим паянням імпульсним струмом.

Вони показують, що тільки під час TIG зварювання розрахункова і експериментальна температури перевищують 400°C (рис. 7a).

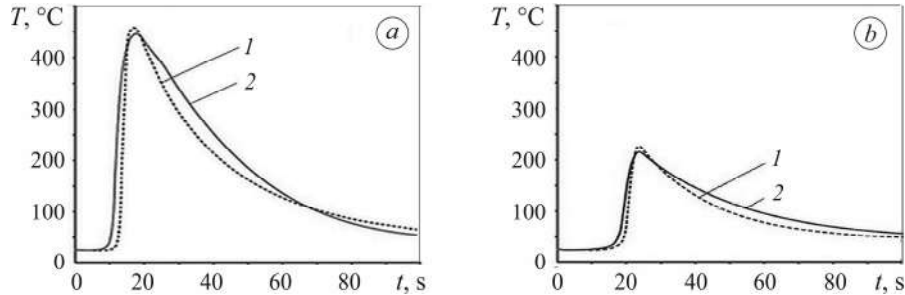


Рис. 6. Термічний цикл під час TIG зварювання дротом Св08Г2С (а) та плазмового паяння з імпульсним струмом і застосуванням припою БрКМц3-1 (b) сталі 08кп на відстані 0,008 м від осі шва: 1 – розрахунковий; 2 – експериментальний.

Fig. 6. Thermal cycle during TIG welding with a Sv08G2S wire (a) and plasma brazing with a pulse current and BrKMts3-1 filler metal brazing (b) of 08kp steel at a distance of 0.008 m from the joint axis: 1 – calculated; 2 – experimental.

Під час TIG паяння імпульсним струмом ізотерми характеризуються значно меншою температурою, яка не перевищує 320°C (рис. 7c). Подальшого її зниження досягають завдяки плазмовому паянню імпульсним струмом (рис. 7e).

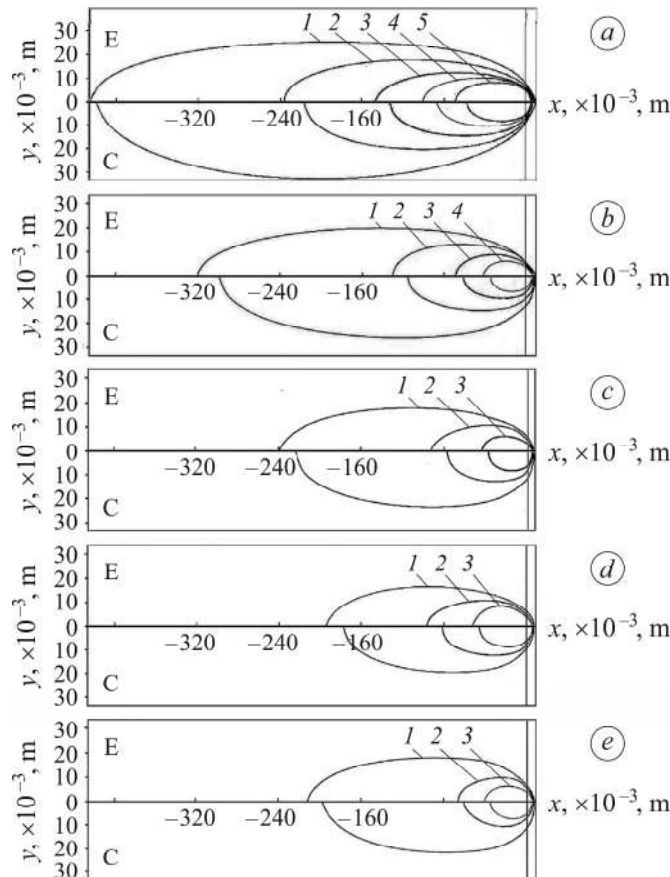


Рис. 7. Ізотерми (E – експериментальні; C – розрахункові), отримані під час TIG зварювання (a); TIG паяння (b); TIG паяння імпульсним струмом (c); плазмового паяння (d); плазмового паяння імпульсним струмом (e).

Fig. 7. Isotherms (E – experimental; P – calculated), determined by TIG welding (a); TIG brazing (b); TIG brazing with a pulse current (c); plasma brazing (d); plasma brazing with pulse current (e).

Порівнюючи ізотерми, отримані розрахунковим і експериментальним способами за TIG зварювання та плазмового паяння з імпульсним струмом сталі 08кп, бачимо різницю в температурних полях і перевагу останнього через суттєве зниження температури. Слід зауважити, що такий розподіл температурного поля у зоні термічного впливу спостерігаємо за застосування числових методів та підтверджуємо експериментальними дослідженнями. Тому комбінований розрахунково-емпіричний метод є найефективніший для вивчення температурного поля в зоні термічного впливу, яка утворюється в основному металі.

ВИСНОВКИ

Під час експериментально-розрахункового аналізу температури металу в шві і зоні термічного впливу за дугового TIG зварювання, TIG паяння, TIG паяння імпульсним струмом, плазмового паяння, плазмового паяння імпульсним струмом стикових з'єднань тонколистової низьковуглецевої сталі 08кп встановлено, що розрахункові термічні криві добре корелюють за геометрією з експериментальними, але характеризуються дещо вищими показниками. Результатами досліджень підтверджують, що використання присадних матеріалів зі значно нижчою температурою плавлення забезпечує суттєве зниження температури в зоні основного металу під час отримання стикових з'єднань тонколистової низьковуглецевої сталі 08кп. На підставі аналізу побудованих ізотерм встановлено, що плазмове паяння зі застосуванням імпульсного струму є найефективнішим серед досліджених методів отримання стикових з'єднань низьковуглецевої сталі 08кп і забезпечує мінімальний вплив температури на основний метал.

1. Матюк В. Ф. Влияние технологии производства листового проката низкоуглеродистых качественных сталей на их структурное состояние и взаимосвязь между механическими и магнитными свойствами // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – № 1. – С. 3–31.
2. Arc brazing in the automotive industry plasma brazing versus mig-brazing advantages and disadvantages / H. Suk, R. Killing, W. Chung, and H. Bang // J. of KWS. – 2006. – 24, № 2. – P. 113–117.
3. Andreazza P., Gericke A., and Henkel K.M. Investigations on arc brazing for galvanized heavy steel plates in steel and shipbuilding // Weld. in the World. – 2021. – 65, № 2. – P. 1199–1210. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01087-2>
4. Mig brazing of galvanized thin sheet joints for automotive / L. Quintino, G. Pimenta, D. Iordachescu, R. M. Miranda, and N. V. Pepe // Industry Mater. and Manufact. Proc. – 2006. – 21, № 1. – P. 63–73. DOI: 10.1081/AMP-200060621
5. Optimization of arc brazing process parameters for exhaust system parts using box-behnken design of experiment / Y. Kim, P-W. Park, K-Y. Park, and J-C. Ryu // J. of Weld. and Join. – 2015. – 33, № 2. – P. 23–31. <http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.2.23>
6. Focussed arc tungsten inert gas brazing of zinc-coated steels / M. Hirsch, J. Dedenbach, S. Lawes, and A. T. Clare // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B // J. of Eng. Manufact. – 2016. – 232, № 2. – P. 296–304. <https://doi.org/10.1177/0954405416639901>
7. Preparing permanent joints of titanium alloys with steel (a review) / V. M. Korzhyk, V. Yu. Khaskin, V. V. Kvasnytskyi, O. V. Ganushchak, I. D. Hos, S. I. Peleshenko, O. I. Demianov, O. V. Konoreva, and N. M. Fialko // Materials Science. – 2023. – 59, № 2. – P. 129–137. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00753-2>
8. Golovko V. V., Kostin V. A., and Zhukov V. V. Influence of nanomodification on the microstructure of the metal of welded joints of low-alloy steels // Materilas Science. – 2024. – 59, № 6. – С. 762–789. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00838-y>
9. Comparison of the corrosion resistances of welded and brazed joints made of galvanized 08Yu steel / S. V. Maksymova, I. V. Zvolinsky, L. I. Nyrkova, and S. O. Osadchuk // Materials Science. – 2022. – 58, №3. – P. 305–315. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00664-8>

10. *Assessment of gas tungsten arc welding thermal cycles on Inconel 718 alloy* / M. Hernández, R. R. Ambriz, R. Cortés, C. M. Gómora, G. Plascencia, and D. Jaramillo // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. – 2019. – **29**. – P. 579–587.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64966-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64966-6)
11. *Dutta J. and Narendranath S.* A parametric study of temperature dependent properties influenced due to transient temperature field developed in arc welded steel butt joints // *Int. J. of Adv. in Eng. Sci.* – 2014. – **4**, № 3. – P. 1–8. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64966-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64966-6)
12. *Prediction of the temperature distribution and microstructure in the HAZ of SA508Gr4 reactor pressure vessel steel* / Q. Bai, Y. N. Ma, S. Xing, Z. Chen, and X. Kang // *ISIJ Int., Adv. Publ. by J-STAGE*. – 2016. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-321>
13. *Evaluation of the effect of the thermal cycle on the characteristics of welded joints through the variation of the heat input of the austenitic AISI 316L steels by the GMAW process* / R. Demarque, E. P. Santos, R. S. Silva, and J. A. Castro // *Sci. and Technol. of Mater.* – 2018. – **30**. – Supplement 1. – P. 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.09.001>
14. *ДСТУ 7809:2015.* Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. – К.: ДП УкрНДНЦ.
15. *Потапьевский А. Г.* Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Ч. 1. Сварка в активных газах. – К.: Экотехнология, 2007. – 192 с.
16. *Maksymova S. V., Zvolinsky I. V., and Yurkiv V. V.* Geometrical parameters of the brazed seam and its structure in plasma brazing of galvanized steel // *The Paton Weld. J.* – 2020. – № 6. – P. 31–35. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.06.06>
17. *Makhnenko O. V, Muzhichenko A. F., and Prudky I. I.* Mathematical modelling of stress-strain state of welded panels from titanium alloy VT20 // *The Paton Weld. J.* – 2013. – № 2. – P. 13–19.
18. *Radaj D.* Heat effects of welding, temperature fields, residual stress, distortion. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. – 367 p. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-48640-1>
19. Електронний ресурс. – https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=356

Одержано 12.04.2024