

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ МІДНИХ ПЛАСТИН У ЗОНІ ШВІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ

М.А. Полещук, А.В. Шевцов, І.В. Доценко, В.М. Теплюк, О.В. Колісніченко, Л.М. Малахова

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

За допомогою хромель-алюмелевих термопар досліджено температурний стан мідних пластин товщиною 10 мм при імітації процесу зварювання тертям з перемішуванням. Термопари приварювались в глухих отворах, розташованих уздовж лінії переміщення зварювального інструмента, що дозволило фіксувати температуру міді в момент формування зварних швів при різних режимах зварювання. У дослідженому діапазоні зміни технологічних параметрів на температуру металу в основному впливає площа взаємодії робочої поверхні зварювального інструмента з пластиною, а частота обертання інструмента впливає несуттєво. В момент утворення зварювальних швів температура металу при різних режимах змінювалась від 528 до 980 °С. Бібліогр. 13, табл. 3, рис. 3.

*Ключові слова:* зварювання тертям з перемішуванням, мідні пластини, термопари, зварювальні шви, температура формування

**Актуальність і мета роботи.** Останнім часом набула розвитку нова технологія з'єднання металевих матеріалів – зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП), запатентована Інститутом зварювання Великобританії в 1991 р. [1]. Для реалізації цієї технології використовується спеціальний обертовий інструмент (рис. 1), який занурюється в стик деталей, що зварюються, і переміщується вздовж нього. Робоча частина (1) цього інструмента має центральний стрижень – пін (2), призначений для нагріву тертям зварювальних кромочок. Над піном розташований заплічик (3), який формує зварювальний шов. Робоча частина інструмента закріплюється в оправці (4), що вставляється в шпіндель зварювальної машини.

Нагрівання зварювальних кромочок здійснюється за рахунок тертя інструмента до їх поверхонь. Теплота, що викликається тертям і деформацією, нагріває з'єднувані метали до пластичного стану, а лінійне переміщення інструмента, який обертається, призводить до перемішування об'ємів пластифікованого металу і в результаті – до з'єднання. Форма, розміри і твердість матеріалу робочої частини інструмента визначаються маркою зварюваного матеріалу і його товщиною.

Технологія ЗТП відрізняється від усіх видів зварювання плавленням відсутністю в зоні формування зварювального шва рідкометалевої фази, при кристалізації якої можуть з'явитися дефекти у вигляді усадкових і ліквацийних тріщин та пористості. Таким чином, ця технологія дозволяє отримувати більш якісний зварювальний шов, а також з'єднувати між собою різнорізні метали і

сплави, котрі не зварюються іншими способами зварювання. Технологія ЗТП спочатку створювалася для зварювання відносно легкоплавких матеріалів, в основному сплавів алюмінію [2]. Дещо пізніше розпочалися роботи по використанню ЗТП для міді [3] і сталей [4, 5].

При розробці технології ЗТП важливо знати рівень температури в зоні формування зварювального шва. Ці відомості дозволяють визначити оптимальні технологічні параметри зварювання – частоту обертання і швидкість лінійного переміщення інструмента, а також оцінити стійкість матеріалу його робочої частини. На жаль, основна маса відомостей про температуру металу в зоні формування зварювального шва оцінюється за результатами вимірювань температури металу в

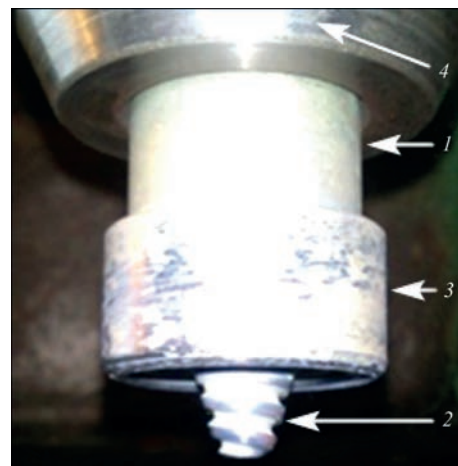


Рис. 1. Зварювальний інструмент для ЗТП (позначення див. у тексті)

Полещук М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-5992-4641>, Шевцов О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9599-4842>, Доценко І.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1040-0409>, Теплюк В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-0463-0689>, Колісніченко О.В. – <https://orcid.org/0000-0003-4507-9050>, Малахова Л.М. – <https://orcid.org/0000-0003-1388-6536>  
© М.А. Полещук, А.В. Шевцов, І.В. Доценко, В.М. Теплюк, О.В. Колісніченко, Л.М. Малахова, 2021

Таблиця 1. Температура металів в районі зварних швів при ЗТП

Номер п/п	Сплав	Область вимірювання	Температура, °С	Посилання
1	AA6061-T6	На поверхні і центрі шва	425	[6]
2	AA7075-T651	~0,6 мм (0,02 дюйма) нижче вершини, що прилягає до зони перемішування	475	[6]
3	AA6061-T6	–	310	[6]
4	AA1050	Близько до нижньої межі зони перемішування	310	[6]
5	AISI-1018	Межа розділу між заплічком і обробленим виробом	990	[6]
6	AA2195-T8	Область, суміжна з краєм піну	450	[6]
7	AZ-31	В зоні термічного впливу (ЗТВ)	360	[6]
8	Pure copper C1 1000	→–	530	[7]
9	Pure copper Cu-OF	Область, суміжна з краєм піну	850	[3]
10	Al сплав 1561	На межі метала шва з основним металом	475	[8]

зоні, розташованій у безпосередній близькості до шва.

У табл. 1 узагальнені максимальні значення температури при ЗТП деяких металів, опубліковані різними авторами. З таблиці видно, що всі наведені в ній значення температури нижче температури солідусу відповідних сплавів.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона проводяться роботи по створенню технології ЗТП різних металів [9, 10]. Особлива увага приділена проблемам зварювання міді і її сплавів методом ЗТП, тому що ці матеріали широко використовуються в металургійному машинобудуванні для виробництва різного типу водоохолоджуючих кристалізаторів [11]. Крім того, були вивчені структури швів з різнорідних металів із різною розчинністю елементів у твердій фазі стосовно нанесення захисних шарів на мідні основи [12].

**Матеріали і методика досліджень.** При розробці оптимальних технологічних параметрів зварювання міді методом ЗТП проведені дослідження температурного стану мідних пластин у зоні утворення зварювальних швів. Вимірювання та реєстрація температури проводились при імітації процесу ЗТП на прямокутних пластинках з міді М1 товщиною 10 мм із застосуванням хромель-алюмелевих термопар, встановлених у глухих отворах, виконаних в тілі пластин. Отвори виконувалися такої глибини, щоб відстань від спая (злюту) термопари до торця піна, що проходить над нею, не перевищувала 1 мм. Спаї (злюти) термопар прикріплялися до дна отворів конденсаторним зварюванням, а їх холодні кінці підводилися до підсилювача сигналу. Після посилення термо-ЕРС сигнал через аналого-цифровий перетворювач NI USB-6009 National Instrument записувався на комп'ютері. Частота дискретизації становила 2с<sup>-1</sup>. Для організації запису і візуалізації зміни температури в ході всього технологічного процесу використовувалося середовище розробки Labview. Ця схема вимірювань дозволяла одночасно записувати показання чотирьох термопар із

розрахунковою похибкою 10 %. Для фіксації температури дві термопари розташовувалися вздовж лінії переміщення зварювального інструмента, причому термопара № 1 розміщувалася в місці занурення піна в тіло пластини, а термопара № 2 знаходилася на відстані 40 мм від неї. Перед проведенням дослідів проводилося тарування термопар, закріплених в тілі пластини при 0 та 100 °С. Температура, зафіксована термопарами, порівнювалася з показаннями контрольного термометра марки TP-101 з ціною поділки 0,1 °С. Похибка вимірювання температури металу не перевищувала 4 %.

В ході досліджень використовувалися два зварювальних інструмента з однаковими заплічками діаметром 34 мм і пінами різних розмірів. Один інструмент мав більший пін з діаметром основи 16 мм, діаметром при вершині 5,5 мм і висотою 8,5 мм. Інший мав менший пін з розмірами 10, 3,5 та 6,5 мм, відповідно. Вісь обертання зварювального інструмента була відхилена від вертикалі на 1,5° в сторону, протилежну напрямку горизонтального переміщення.

Було проведено дві групи експериментів. У першій – в тіло пластини занурювався тільки пін, а заплічник знаходився на відстані 0,1 мм від її поверхні. У другій групі експериментів імітувався стандартний процес ЗТП.

**Результати досліджень і обговорення.** У першій групі процес починався зануренням піна в поверхню пластини над місцем розташування термопари № 1. Попередньо на поверхню пластини в цьому місці наклеювалася фольга товщиною 0,1 мм. У момент торкання фольги нижнім краєм заплічка занурення інструмента припиняли і розпочинали його горизонтальне переміщення в напрямку термопари № 2. В ході дослідів на графіках показників термопар виконувалися тимчасові відсікання: перше – в момент торкання торцем піна поверхні пластини, друге – в момент початку горизонтального руху інструмента і третє – в момент проходження піна над другою термопарою. У табл. 2 наведені значення параметрів тех-

Таблиця 2. Параметри режимів ЗТП в першій групі експериментів

Номер режиму	Вид піна	ЧО, об/хв	ШП, мм/хв	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
1	МП	800	40	216	312
2	ВП	800	40	438	557
3	ВП	800	50	441	559
4	ВП	1000	40	456	571

нологічних режимів ЗТП: частота обертання зварювального інструмента (ЧО), швидкість його горизонтального переміщення (ШП), а також зазначений вид робочих частин зварювальних інструментів з великим (ВП) і малим (МП) пінами. Крім того, в таблиці надані значення максимальної температури, зафіксовані при цих режимах першою термопарою ( $t_1$ ) та другою термопарою ( $t_2$ ).

При кожному режимі ЗТП отримані дві криві зміни температури в досліджуваних точках мідних пластин. На рис. 2 наведені приклади температурних кривих, отриманих при першому (а) і другому (б) технологічних режимах ЗТП (див. табл. 2). При інших режимах отримані графіки аналогічного виду, що відрізняються значеннями максимальної температури, зафіксованими термопарами.

У місці занурення зварювального інструмента в тіло пластин температура міді починає підвищуватися відразу після торкання її поверхні торцем піна (відсічення 1). По мірі занурення піна температура зростає і досягає свого максимуму в момент закінчення процесу впровадження. Після початку горизонтального руху робочого інструмента (відсічення 2) температура в цьому місці знижується через вилучення джерела тепловиділення від місця вимірювання. Температурні криві, зафіксовані першими термопарами, свідчать, що в момент занурення зварювального інструмента теплота виділяється переважно за рахунок тертя. Це підтверджується аналізом максимальних значень температури в цих місцях при ЗТП на різних режимах (див. табл. 2). Дійсно, величина максимальної температури в основному залежить від площі поверхні тертя, а частота обертання зварювального інструмента впливає несуттєво.

Графіки зміни температури міді, зафіксованої термопарами № 2, показують, що початок підвищення температури в цих точках відстає від показань першої термопарі, тому що теплота до них передається за рахунок теплопровідності. Час відставання зумовлений швидкістю поширення температури в міді. Після початку горизонтального переміщення зварювального інструмента потужність джерела тепловиділення зростає завдяки додатковій теплоті від пластичної деформації металу поблизу піна. На графіках ці зміни температури відображаються у вигляді збільшення кута нахилу до горизонтальної осі температурних кривих на термопарах № 2. По мірі наближення зварювального інструмента до місць розташування других термопар відбувається подальше підвищення темпу зростання температури. Величина температури металу досягає максимальних значень в момент проходження піна над термопарою № 2 (відсічення 3).

Аналіз значень температури, наведених у табл. 2, показує, що температура пластин в місцях розташування термопар № 2 приблизно на  $100\text{ }^\circ\text{C}$  вища, ніж в місцях впровадження піна. Очевидно, що збільшення температури в місці розташування термопарі № 2 є результатом додаткового виділення тепла, пов'язаного з пластичною деформацією матеріалу пластини. Ця температура істотно залежить від розмірів піна, тобто від площі взаємодії робочої частини зварювального інструмента з матеріалом пластини. Максимальна температура зафіксована нами при імітації ЗТП з частотою обертання інструмента  $1000\text{ об/хв}$ . Вплив швидкості горизонтального переміщення робочої частини зварювального інструмента в досліджуваному діапазоні не виявлено.

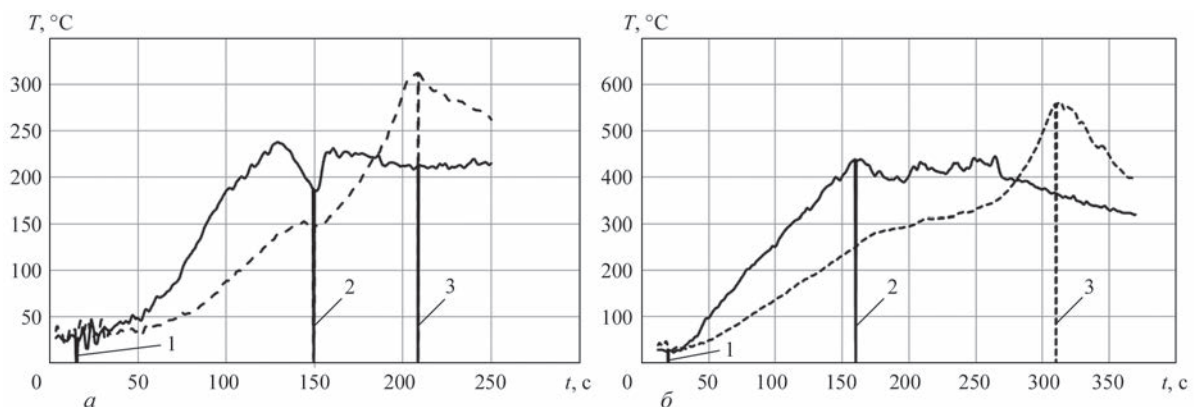


Рис. 2. Графіки зміни температури мідних пластин в процесі ЗТП: а – 800/40 МП; б – 800/40 ВП (суцільна лінія – зміни температури в місці впровадження піна; переривчаста – в місці розташування другої термопарі); 1, 2, 3 – тимчасові відсічення (опис в тексті)

Аналіз температурних кривих, наведених на рис. 2, дозволяє зробити припущення, що при ЗТП металевих матеріалів з високою теплопровідністю можливі два варіанти нагріву крайок зварювальних виробів. При швидкостях лінійного переміщення інструмента менших, ніж лінійна швидкість поширення температури в матеріалі зварюваних виробів, перед фронтом інструмента відбувається попередній підігрів металу, тому додаткове тепловідлення від роботи інструмента відбувається на більш нагрітих ділянках. Температура металу в момент утворення зварювальних швів буде зростати по мірі збільшення їх довжини. Якщо швидкість зварювального інструмента вище швидкості поширення температури, то попередній підігрів металу перед фронтом, що обертається, відсутній і вздовж лінії розділу не буде відбуватися підвищення температури, при якій утворюється зварювальний шов.

Швидкість поширення температури в металах визначається коефіцієнтом температуропровідності, який чисельно дорівнює відношенню коефіцієнта теплопровідності до питомої теплоємності, і має розмірність  $\text{м}^2/\text{с}$ . Цей коефіцієнт слід розглядати як площу поверхні, перед фронтом якої за одиницю часу з початку нагрівання відбувається збільшення початкової температури металу. Теоретично, для напівзамкненого тіла такою поверхнею буде півсфера, котра розширюється, в центрі якої діє точкове джерело теплоти. Для пластин такою поверхнею слугуватиме верхній кульовий пояс напівсфери, висота якого дорівнює товщині пластини. Радіус напівсфери, що розширилася за одиницю часу, можна розглядати як лінійну швидкість поширення температури по поверхні тіла або пластини.

Для різних марок міді коефіцієнт температуропровідності знаходиться в межах  $111,0 \dots 115,0 \text{ мм}^2/\text{с}$  [13]. При цьому теоретична лінійна швидкість поширення температури для мідних пластин товщиною 10 мм в середньому дорівнює  $108 \text{ мм/хв}$ . Однак реальна лінійна швидкість поширення температури в мідних пластинах при ЗТП може бути менше теоретичної, тому що робоча поверхня зварювального інструмента не створює точкового джерела теплоти, а сама пластина знаходиться на металевій підкладці з іншим коефіцієнтом температуропровідності, що вносить корективи в загальну площу поверхні кульового поясу напівсфери.

Реальна швидкість поширення температури в мідних пластинах товщиною 10 мм при різних режимах ЗТП оцінена нами експериментально. Для цього на температурних кривих (рис. 2) визначали проміжок часу між моментами початку зростання температури металу в точках розташування термопар № 1 та № 2. На підставі цих даних була визначена середня швидкість поширення температури для всіх режимів ЗТП. Ця швидкість становила близько  $100 \text{ мм/хв}$ . Тобто швидкість горизонтального переміщення зварювального інструмента в  $100 \text{ мм/хв}$  може бути оптимальною для забезпечення постійної температури в зоні з'єднання по всій довжині зварювального шва для мідних пластин товщиною  $8 \dots 12 \text{ мм}$  (хоча це припущення вимагає додаткової експериментальної перевірки). У другій групі експериментів проводилась імітація стандартного процесу ЗТП з різною частотою обертання і швидкістю переміщення зварювального інструмента та різною площею взаємодії його робочої частини з пластиною. Ця площа визначалась за глибиною сліду, що залишається заплічком на поверхні пластини після зварювання, з використанням креслення інструмента в конструкторській програмі SOLIDWORK.

Таким чином, з урахуванням похибок, що виникають при вимірі всіх параметрів, які визначають режими ЗТП (частоти обертання, швидкості переміщення, глибини сліду, точності розміщення термопар в тілі пластин) загальна розрахункова похибка вимірювань температури при проведенні другої групи експериментів склала 20 %. Конкретні параметри досліджених режимів ЗТП наведені в табл. 3, в якій додатково показані глибина сліду заплічка (ГС) і площа взаємодії інструмента з пластиною (ПВ).

Вид температурних кривих, отриманих при всіх режимах ЗТП в другій серії експериментів, аналогічний кривим, наведеним на рис. 2. Істотною відмінністю є величина температури металу. Ця температура нижча за температуру плавлення міді при всіх режимах ЗТП, зазначених у таблиці. При металографічних дослідженнях в поперечних перерізах зварювальних швів не виявлені литі структури навіть при режимах ЗТП, при яких температура металу досягала  $900$  та  $980 \text{ }^\circ\text{C}$ . Таким чином, результати експериментальних досліджень переконливо підтверджують, що при ЗТП міді в

Таблиця 3. Параметри режимів ЗТП у другій серії експериментів

Параметри режиму	Номер режиму									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЧО, об/хв	800	800	800	1000	1000	1000	800	800	1000	1000
СП, мм/хв	40	40	40	50	50	50	40	40	40	50
ГС, мм	0,36	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,3	0,5	0,2	0,35
ПВ, $\text{мм}^2$	180,88	194,96	280,77	130,88	194,96	280,77	160,13	235,11	130,88	177,55
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	-	-	-	-	-	-	644	588	428	660
$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	700	710	900	530	780	980	670	695	528	715

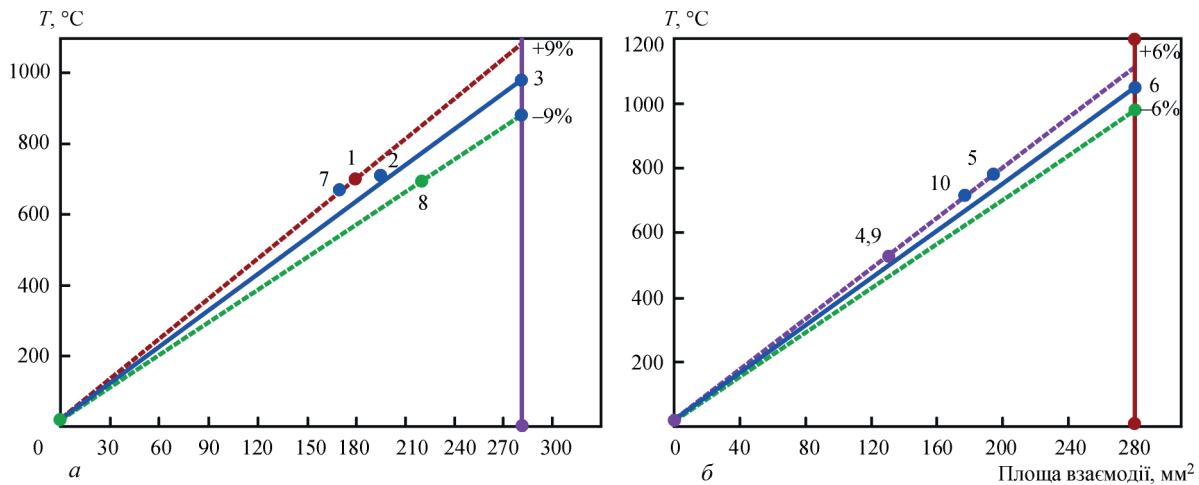


Рис. 3. Залежність температури міді від площі взаємодії: а – ЧО 800 об/хв; б – 1000 (нумерація точок відповідає режимам ЗТП табл. 3)

момент утворення зварювальних швів відсутня рідкометалева фаза.

У дослідженому діапазоні зміни технологічних параметрів ЗТП температура металу в момент утворення зварювальних швів в основному залежить від площі взаємодії зварювального інструмента з тілом пластини.

На рис. 3 показані графіки цих залежностей при частотах обертання зварювального інструмента 1000 (а) та 800 об/хв (б). Ці графіки побудовані шляхом узагальнення максимальних значень температури металу при відповідній частоті обертання (табл. 3). Похибка побудови графіків була меншою розрахунковою похибки вимірювання температури в проведених експериментах. З графіків видно, що при мінімальній зміні глибини занурення зварювального інструмента в тіло пластини температура металу істотно змінюється. Цей факт пояснює великий діапазон експериментальних значень температури металу в момент формування зварювальних швів при ЗТП конкретних металевих матеріалів, наведених в літературі. В дослідженому діапазоні частота обертання зварювальних інструментів мало впливає на температуру металу при формуванні зварювальних швів. Впливу зміни швидкості переміщення зварювального інструмента від 40 до 50 мм/хв виявлено не було.

В наступній статті будуть приведені результати дослідження температури металу в момент утворення зварювальних швів в широкому діапазоні зміни частоти обертання і швидкості горизонтального переміщення зварювального інструмента, а також розподіл значень температури в поперечному перерізі зварювальних швів.

**Висновки**

1. При ЗТП міді температура, при якій формується зварювальний шов, в основному визначається площею взаємодії робочої частини зварювального інструмента з тілом пластини. У

дослідженому діапазоні при мінімальній площі взаємодії температура міді в місці утворення зварювального шва становить 528 °С, а при максимальній досягає 980 °С.

2. У дослідженому діапазоні частота обертання зварювального інструмента мало впливає на температуру міді в місцях утворення зварювального шва.

3. Аналіз термічних циклів при ЗТП пластин з матеріалів із високою теплопровідністю при різних технологічних параметрах зварювання дозволяє припустити два варіанти утворення зварювальних швів. Вони відрізняються характером зміни температури металу по довжині зварювальних швів у момент їх формування в залежності від швидкостей горизонтального переміщення зварювального інструмента. При швидкостях інструмента, котрі перевищують лінійну швидкість поширення температури в матеріалі зварюваного виробу, температура металу при формуванні зварювальних швів буде лишатись постійною по всій їх довжині. Такий варіант утворення зварювальних швів при ЗТП мідних пластин товщиною 8...12 мм, за попередніми оцінками, можливий при швидкостях горизонтального переміщення інструмента, які перевищують 100 мм/хв. При швидкостях переміщення інструмента менших, ніж лінійна швидкість поширення температури в матеріалі зварюваного виробу, температура металу в момент утворення зварювальних швів буде зростати по мірі збільшення їх довжини. У цьому випадку для отримання якісних зварювальних швів слід застосовувати примусове охолодження зварюваного виробу.

**Список літератури**

1. Thomas W.M. (1991) *Friction stir butt welding. Pat. 9125978.8 GB*, Publ. 01.12.91.
2. Dawes C., Thomas W. (1995) *TWI Bull.*, 6, Nov/Dec.
3. Savolainen K. (2012) *Doctoral Dissertation «Friction stir welding of copper and microstructure and properties of the weld»*. Aalto University publication series 13/2012.
4. Manish P. Meshram, Basanth Kumar Kodli, Suhash R. (2014) *Dey «Friction stir welding of austenitic stainless steel by pcbn*

tool and its joint analyses». 3<sup>rd</sup> International Conference on Materials Processing and Characterization (ICMPC 2014).

5. Brian T. Thompson. (2010) *THESIS «Tool Degradation Characterization in the Friction Stir Welding of Hard Metals»*. The Ohio State University.
6. De P.S., Kumar N., Mishra R.S. ? *Fundamentals of Friction Stir Welding. ASM Handbook*. 6A, 186–199.
7. Hwang Y.M., Fan P.L., Lin C.H. (2010) Experimental study on Friction Stir Welding of copper metal». *J. of Materials Processing Technology*, 210, 1667–1672.
8. Павлова В.И., Алифиренко Е.А., Осокин Е.П. (2009) Исследование температурно-временных условий сварочного нагрева, структуры и свойств металла стыковых соединений из алюминийево-магниевого сплава, выполненных сваркой трением с перемешиванием». ISSN 1994-6716. *Вопросы материаловедения*, 4, 60. ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург.
9. Григоренко Г.М., Поleshchuk М.А., Adeeva Л.И. и др. (2016) Особенности структуры соединений материалов Cu–Cu, Ni–Cu, сталь–Cu, полученных внахлест способом сварки трением с перемешиванием. *Автоматическая сварка*, 5-6, 82–87.
10. Красновский К., Хохлова Ю.А., Хохлов М.А. (2019) Влияние формы инструмента для сварки трением с перемешиванием на физико-механические свойства сварных соединений алюминийевого сплава EN AW 6082-T6. *Там же*, 7, 9–15.
11. Григоренко Г.М., Adeeva Л.И., Туник А.Ю. и др. (2015) Восстановительный ремонт слябовых медных кристаллизаторов МНЛЗ. Структура и свойства металла в зоне соединения. *Современная электрометаллургия*, 1, 44–49.
12. Григоренко Г.М., Adeeva Л.И., Туник А.Ю. и др. (2014) Особенности структуры сварных соединений металлов с различной растворимостью элементов в твердой фазе, полученных сваркой трением с перемешиванием. *Автоматическая сварка*, 4, 13–23.
13. <https://www.bnl.gov/magnets/Staff/Gupta/cryogenic-data-handbook/Section 15.pdf>.

References

1. Thomas, W.M. (1991) *Friction stir butt welding. Pat. 9125978.8 GB*, Publ. 01.12.91.

2. Dawes, C., Thomas, W. (1995) *TWI Bull.*, 6, Nov/Dec.
3. Savolainen, K. (2012) *DPh: Friction stir welding of copper and microstructure and properties of the weld*. Aalto University publication series 13/2012.
4. Manish P. Meshram, Basanth Kumar Kodli, Suhash R. (2014) *Dey: Friction stir welding of austenitic stainless steel by pcbn tool and its joint analyses*. In: Proc. of 3rd Int. Conf. on Materials Processing and Characterization (ICMPC 2014).
5. Brian T. Thompson. (2010) *Thesis: Tool Degradation Characterization in the Friction Stir Welding of Hard Metals*. The Ohio State University.
6. De P.S., Kumar N., Mishra R.S. (2005) *Fundamentals of Friction Stir Welding. ASM Handbook*. 6A, 186–199.
7. Hwang, Y.M., Fan, P.L., Lin, C.H. (2010) Experimental study on friction stir welding of copper metal. *J. Materials Proc. Technology*, 210, 1667–1672.
8. Pavlova, V.I., Alifirenko, E.A., Osokin, E.P. (2009) Study of temperature-time conditions of welding heating, structure and properties of metal of butt joints from aluminium-magnesium alloy produced by friction stir welding. ISSN 1994-6716. *Voprosy Materialovedeniya*, 4, 60. St.-Petersburg, TsNII KM Prometey [in Russian].
9. Grigorenko, G.M., Poleshchuk, M.A., Adeeva, L.I. et al. (2016) Peculiarities of structure of Cu-Cu, Ni-Cu and steel-Cu joints produced by overlap friction stir welding method. *The Paton Welding J.*, 5-6, 75-80.
10. Krasnovsky, K., Khokhlova, Yu.A., Khokhlov, M.A. (2019) Influence of tool shape for friction stir welding on physico-mechanical properties of welded joints of EN AW 6082-T6 aluminium alloy. *Ibid.*, 7, 9–15 [in Russian].
11. Grigorenko, G.M., Adeeva, L.I., Tunik, A.Yu. et al. (2015) Restoration repair of slab copper moulds of MCCB. Structure and properties of metal in the joint zone. *Sovrem. Elektrometal.*, 1, 44–49 [in Russian].
12. Grigorenko, G.M., Adeeva, L.I., Tunik, A.Yu. et al. (2014) Structural features of FSW joints of metals with different element solubility in the solid phase. *The Paton Welding J.*, 4, 13–23.
13. <https://www.bnl.gov/magnets/Staff/Gupta/cryogenic-data-handbook/Section 15.pdf>.

INVESTIGATION OF TEMPERATURE STATE OF COPPER PLATE IN THE WELD ZONE AT FRICTION STIR WELDING

M.A. Poleshchuk, A.V. Shevtsov, I.V. Dotsenko, V.M. Teplyuk, O.V. Kolisnichenko, L.M. Malakhova

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Chromel-alumel thermocouples were used to study the temperature state of 10 mm copper plates at simulation of the process of friction stir welding. Thermocouples were welded on in blind holes located along the line of welding tool displacement that allowed recording the copper temperature at the moment of weld formation under different welding conditions. In the studied range of variation of process parameters, the metal temperature is mainly influenced by the area of interaction of the welding tool working surface with the plate, while the speed of tool rotation has a minor effect. At the moment of weld formation the metal temperature varied from 528 up to 980 in different modes. 13 Ref., 3 Tabl., 3 Fig.

Keywords: friction stir welding, copper plates, thermocouples, welds, formation temperature

Надійшла до редакції 02.02.2021

МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ  
СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ З'ЄДНАННЯ  
МАТЕРІАЛІВ

м. Київ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
31 травня – 2 червня 2021 р.

тел./факс: (38044) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.pwi-scientists.com/ukr/modernweld2021

