

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ СПЛАВУ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ

І. О. ВАКУЛЕНКО, С. О. ПЛІТЧЕНКО

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.
49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2. E-mail: plit4enko@ukr.net

На прикладі алюмінієвого сплаву пропонується методика визначення параметрів процесу з'єднання пластин за технологією зварювання тертям з перемішуванням. В процесі досліджень за різних співвідношень частоти обертання робочого інструмента та нормального притискання до з'єднуваних кромок визначено характер розігріву металу. З аналізу характеру підвищення температури розігріву з'єднуваних кромок визначено мінімальне значення температурного інтервалу при реалізації технології зварювання тертям з перемішуванням. За аналізом отриманих експериментальних даних пропонується концепція визначення основних параметрів процесу зварювання. Бібліогр. 17, рис. 9.

Ключові слова: зварювання тертям з перемішуванням; теплова енергія; робочий інструмент; режими зварювання; сплави на основі алюмінію; оптимальна температура

Зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) відноситься до дифузійних технологій, яким притаманна відсутність розігріву до температур плавлення металу (рис. 1).

Основним джерелом тепла за такою технологією є сили тертя, які виникають між поверхнями металу, що зварюється, та робочою частиною спеціального інструмента [2–4].

За такою технологією інтенсивність необхідної енергії визначається комплексним впливом частоти обертання інструмента навколо власної осі, сили притискання і швидкості його переміщення уздовж з'єднуваних кромок за умов оптимальних геометричних розмірів і форми робочого інструмента [5].

Разом з цим висока чутливість процесу ЗТП до незначних змін технологічних характеристик суттєво ускладнює підтримку оптимальних умов зварювання, особливо коли зварний контур відрізняється від прямої лінії. Дійсно, за умов постійної сили притискання співвідношення між частотою обертання і швидкістю переміщення уздовж з'єднуваних кромок робочого інструмента дозволяє без ускладнень керувати процесом розігріву металу в зоні зварного шва. В протилежність цьому, складніше підтримувати стаціонарний режим зварювання при зміні лише сили притискання, коли рекомендована температура відповідає вузькому інтервалу 0,8...0,95 від температури плавлення металевго матеріалу [5, 6].

Враховуючи, що робочий інструмент визначає процес утворення та розподіл теплової енергії в зоні зварювання, розміри його складових і форма (рис. 2) суттєво впливають на якість зварного з'єднання.

Кожна з частин інструмента забезпечує виконання певних функцій при перетворенні механічної енергії тертям в теплову. Так, заплечик забезпечує отримання приблизно 80...90 % необхідної енергії для розігріву кромок [7], решта генерується штирем. Таким чином, за умов потрібного ступеню розігріву металу від механічного контакту, основний внесок в ЗТП обумовлюється заплечиком.

Детальний аналіз структурних перетворень в металі після ЗТП свідчить, що лише специфічна форма робочого інструмента забезпечує необхідний розподіл температури розігріву по перетину контактних поверхонь [3, 8].

В залежності від вирішення технологічних питань на робочій поверхні інструмента, наприклад, для руйнування оксидних плівок або підвищення ступеня перемішування металу з'єднуваних кро-

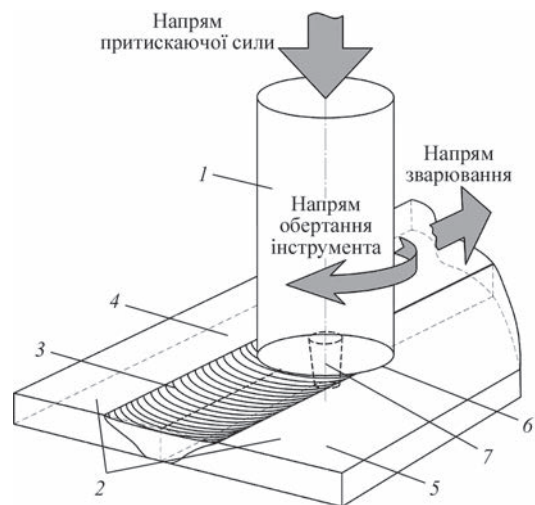


Рис. 1. Процес зварювання двох пластин [1]: 1 — інструмент; 2 — пластини; 3 — зварний шов; 4 — сторона набігу інструмента; 5 — сторона повернення інструмента; 6 — заплечик; 7 — штир

мок, може виготовлятися спеціальний рельєф [9]. За результатами досліджень робіт [2, 4, 10], виготовлення канавок сприяє досягненню підвищеного рівня комплексу властивостей металу зварного з'єднання.

В порівнянні із заплечиком штир робочого інструмента має дещо інше призначення. Його робота забезпечує перерозподіл теплової енергії, достатньої для підтримки визначених умов розвитку процесів дифузійного масопереносу металу по товщині з'єднуваних кромок за термін активної дії інструмента.

Форма штиря робочого інструмента і його діаметр мають якісну залежність від низки факторів: кута його нахилу під час зварювання, товщини основного металу, хімічного складу та ін. [7]. Нанесення на поверхню штиря канавок у вигляді нарізки допомагає керувати потоком пластифікованого металу, спрямовуючи його на ущільнення певних ділянок шва. Такий вплив зменшує вірогідність появи непровару кореня зварного шва [8].

В порівнянні з технологіями часткового або повного розплавлення використання ЗТП дозволяє суттєво зменшити ступінь перегріву металу в зоні термічного впливу шва. Перспективними напрямками застосування такої технології є з'єднання елементів з різнорідних матеріалів, які утворюють гетерогенні розплави або хімічно нестабільні багатофазні суміші при кристалізації. Отримані з'єднання за традиційними технологіями, наприклад, при електричному дуговому зварюванні, можуть мати непередбачуваний негативний вплив на якість зварного з'єднання.

Метою роботи є удосконалення методики визначення радіусу заплечика робочого інструмента при ЗТП.

Матеріал і методика проведення досліджень. ЗТП проводили на спеціально розробленому устаткуванні, яке разом з вибраними параметрами робочого інструмента [10–12] забезпечувало формування зварного з'єднання.

Процес ЗТП (рис. 1) виконувався за наступною схемою: робочий інструмент 1, з певною частотою обертання навколо власної осі, розташовували під кутом 1...3° відносно площини з'єднуваних кромок. Постійне нормальне зусилля інструмента було необхідне для занурення заплечика на глибину до 10 % товщини кромки. Виникнення сил тертя по контактних поверхнях заплечика 5, штиря 6 і з'єднуваних елементів 3 та 4 забезпечує потрібну ступінь розігріву основного металу. Дія штиря приводить до рівномірного розподілу тепла по товщині кромок. Після досягнення необхідного ступеня розігріву, метал починає перемішуватися.

Матеріалом для робочого інструмента була використана швидкорізальна сталь Р9, яка забезпе-

чує збереження форми і розмірів інструмента при підвищених температурах нагріву при реалізації технології ЗТП більшості сплавів на основі алюмінію [5]. Форма і розміри робочого інструмента (рис. 2) були визначені на основі аналізу відомих експериментальних даних [1, 3–5].

Дослідження технології ЗТП проводили на пластинах товщиною 1,85 мм зі сплаву алюмінію АМг3 з вмістом хімічних елементів в межах марочного складу.

Зміну температури в зоні зварювання та рівня притискання інструмента здійснювали за допомогою спеціально розробленого дослідницького стенду (рис. 3), який розташовували на опорній плиті 1 фрезерувального верстата. Стенд складався з елементів каркасу 2, рухомої металевої пластини 4 та теплоізолятора 5, виготовленого зі слюди. Сила притискання робочого інструмента до основного металу під час зварювання вимірювалася динамометром типу ДС-0,1 з індикаторною голівкою.

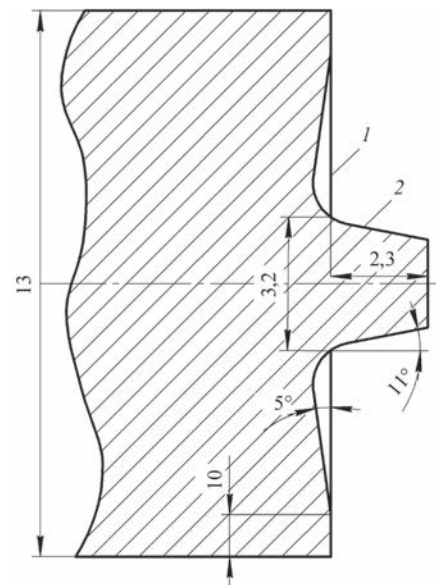


Рис. 2. Схематичне зображення робочого інструмента для ЗТП: 1 — заплечик; 2 — штир

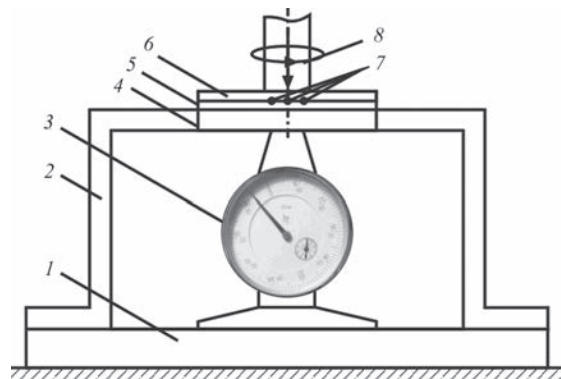


Рис. 3. Схема стенду для досліджень: 1 — опорна плита верстату; 2 — каркас стенду; 3 — динамометр; 4 — рухома плас-тина; 5 — теплоий ізолятор; 6 — зварюваний зразок; 7 — терморпарі; 8 — робочий інструмент

Температуру розігріву з'єднуваних кромок T визначали зануреними в метал термopарами типу хромель-алюмель на різній відстані від осі зварного шва. Швидкість обертання робочого інструмента ω змінювали від 800 до 1600 хв⁻¹, при зусиллі притискання до поверхні пластин не більше 1,45 кН. Швидкість переміщення інструмента уздовж шва $v_{зв}$ була постійною і складала 50 мм/хв.

Отримані результати та обговорення. В процесі досліджень за різних співвідношень частоти обертання робочого інструмента та його нормального притискання до з'єднуваних кромок регулювали ступінь розігріву металу.

На рис. 4 наведені результати впливу технологічних параметрів процесу ЗТП на температуру розігріву металу в зоні дії заплечика робочого інструмента.

З аналізу характеру співвідношення $P = f(T)$ визначали оптимальну температуру розігріву металу кромок за умов різкого підвищення пластичних властивостей. Незалежно від швидкості обертання інструмента і сили його притискання значення мінімальної температури знаходилось у відносно вузькому інтервалі 70...85 °С. З урахуванням можливих неконтрольованих відхилень при підтримці стабільних умов процесу зварювання, для спрощення аналізу теплового балансу, було прийнято середнє значення температури 76 °С, що відповідала моменту пластифікації сплаву.

Порівняльний аналіз з абсолютними значеннями температури початку розвитку рекристалізації T_p для різноманітних сплавів за залежністю $T_p = 0,4T_{пл}$, де $T_{пл}$ — температура плавлення металу, свідчить про достатньо якісний збіг між ними.

Детальний аналіз форми кривих $P = f(T)$ (рис. 4) з урахуванням стадійності процесів структурних перетворень за умов гарячого обтиску-

вання [13] свідчить, що від моменту формування горизонтальної ділянки до різкого зниження зусилля притискання процеси внутрішньої перебулудови сплаву обумовлені розвитком у визначеному співвідношенні динамічних процесів полігонізації і рекристалізації.

Таким чином, момент формування горизонтальної ділянки може бути прийнятим в якості мінімального значення температурного інтервалу процесу ЗТП, а різке зниження T — максимально припустимим значенням.

Форма кривих і точки якісних змін співвідношення $P = f(T)$ свідчать про залежність умов досягнення надпластичного стану металу від параметрів процесу ЗТП. Дійсно, якщо температура початку пластифікації залишається практично незалежною від співвідношення ω і P , то досягнення надпластичного стану (ділянка спаду сили притискання) в більшій мірі визначається величиною ω .

З метою визначення параметру, який має найбільший вплив на пластичність сплаву для різних співвідношень швидкості обертання і сили притискання робочого інструмента, здійснили оцінку необхідної теплової енергії Q для реалізації ЗТП. Враховуючи, що досягнення умов перемішування металу є термічно активованим процесом, для оцінки Q було використано відоме рівняння [14]:

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) P^m, \quad (1)$$

де $\dot{\epsilon}$ — швидкість деформації; A — коефіцієнт пропорційності; R — універсальна газова постійна; T — температура (К); P — силова характеристика; m — показник ступеня.

За умов експерименту, співвідношення (1) було перетворено до вигляду:

$$Q = RT(m \ln P - \ln \omega), \quad (2)$$

де ω — частота обертання; P — сила притискання робочого інструмента.

Оснoву розрахунку Q склали експериментальні дані (рис. 4) різноманітних режимів зварювання.

Для товщини кромок 1,85 мм, підставляючи експериментальні значення для сталого режиму у співвідношення (2): $\omega = 13,3 \text{ с}^{-1}$ (800 хв⁻¹), $P = 1 \text{ кН}$; $\omega = 20,8 \text{ с}^{-1}$ (1250 хв⁻¹), $P = 0,59 \text{ кН}$ та $\omega = 26,7 \text{ с}^{-1}$ (1600 хв⁻¹), $P = 0,275 \text{ кН}$, для температур в зоні зварювання $0,7T_{пл}$, отримали відповідні значення Q . Характер залежності Q від ω наведено на рис. 5.

Наведені результати свідчать, що при підвищеній частоті обертання за умов сталої швидкості зварювання, нагрів до потрібної температури в зоні зварювання досягається меншим рівнем енергії.

Таким чином, зниження потрібної енергії може бути досягнуто зменшенням нормального сили

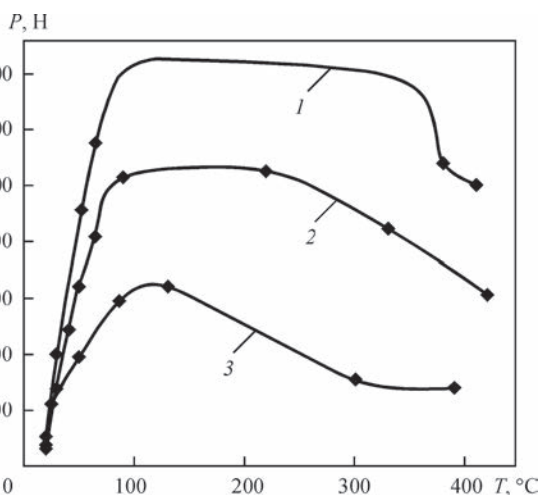


Рис. 4. Експериментальні криві впливу швидкості обертання ω і сили притискання P робочого інструмента ($v_{зв} = \text{const}$) на температуру розігріву кромок сплаву під заплечиком: 1 — $\omega = 800$; 2 — 1250; 3 — 1600 об/хв

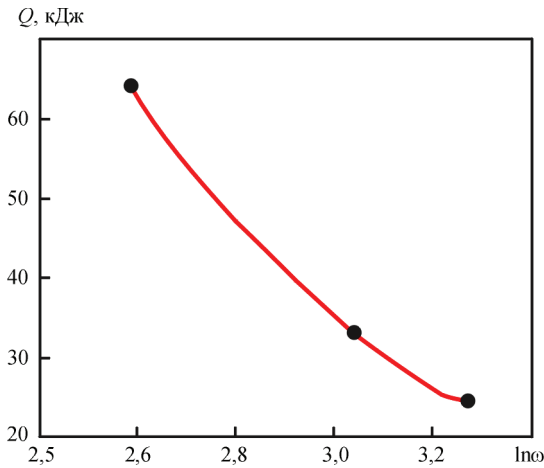


Рис. 5. Залежність величини енергії Q для усталеного процесу зварювання (при $0,7T_{пл}$) від частоти обертання робочого інструмента $\ln \omega$ і сили притискання при $v_{зв} = \text{const}$

притискання робочого інструмента до заготовок при збільшенні ω в процесі зварювання, що підтверджується на рис. 4 кривою 3.

Разом з цим за умов мінімальної сили P (0,275 кН) визначено інший характер зміни розрахованої за (2) кількості енергії від частоти обертання робочого інструмента (рис. 6).

Сумісний аналіз розрахованих значень Q (рис. 5, 6) свідчить про необхідність визначення оптимальної енергії для зварювання тертям з перемішуванням і можливої залежності від геометричних розмірів робочого інструмента. Враховуючи внесок заплечика в енергетичний баланс при ЗТП, була зроблена спроба оцінити оптимальний діаметр заплечика робочого інструмента для різних товщин з'єднуваних кромок. З цією метою було використано співвідношення залежності теплового балансу процесу зварювання тертям від основних технологічних параметрів [15]:

$$N = \frac{2}{3} \pi \mu r \omega R_{\text{інс}}^3, \quad (3)$$

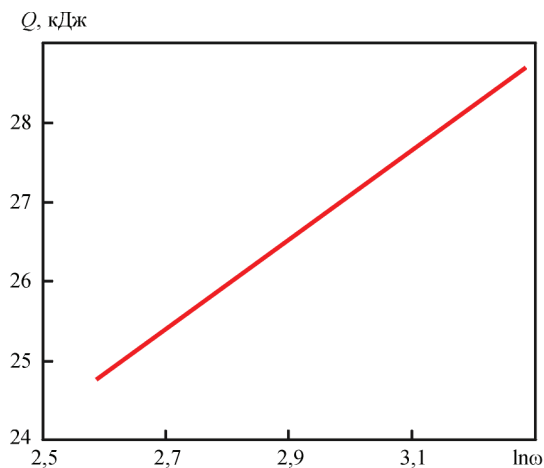


Рис. 6. Залежність кількості енергії Q для усталеного процесу зварювання від частоти обертання робочого інструмента ($\ln \omega$) при $P = 0,275$ кН, $v_{зв} = \text{const}$ за співвідношенням (2)

де N — енергетична характеристика; μ — коефіцієнт тертя; p — питомий нормальний тиск інструмента; ω — кутова швидкість обертання; $R_{\text{інс}}$ — радіус заплечика інструмента.

Із співвідношення (3), $R_{\text{інс}}$ дорівнює:

$$R_{\text{інс}} = \sqrt[3]{\frac{3N}{2\pi\mu r\omega}}. \quad (4)$$

Результати розрахунку $R_{\text{інс}}$ за (4) з використанням гіпотетичних значень Q для досліджених інтервалів змін P і ω наведені на рис. 7.

З метою перевірки виконання залежності (4) були використані замість N оцінені величини Q з експерименту [16]. Отримані дані по $R_{\text{інс}}$ для умов експерименту при ЗТП для $\delta = 1,85$ мм свідчать про достатньо якісний збіг з розрахованими за (4).

Аналізи результатів експериментальних досліджень та проведених розрахунків підтверджують існуючу залежність величини теплової енергії в зоні зварювання, в першу чергу, від радіуса заплечика робочого інструмента: зменшення $R_{\text{інс}}$ приводить до зниження Q .

В процесі зварювання розташування інструмента під кутом $1 \dots 3^\circ$ відносно нормалі до заготовки забезпечує необхідні умови для ущільнення металу. Очікувана нерівномірність розподілу температури по площині плями контакту (заплечика) має місце лише на початкових етапах до виходу на оптимальні умови зварювання. Після цього досягаються стабільні умови процесу виділення теплової енергії.

При проектуванні робочого інструмента необхідно враховувати, що діаметр заплечика не тільки визначає рівень механічних навантажень на обладнання в цілому, але й ширину зони розігріву. За умов підвищених частот обертання робочого інструмента надмірне збільшення $R_{\text{інс}}$ може призвести до перегріву зварного з'єднання, що буде мати негативний відбиток на його механіч-

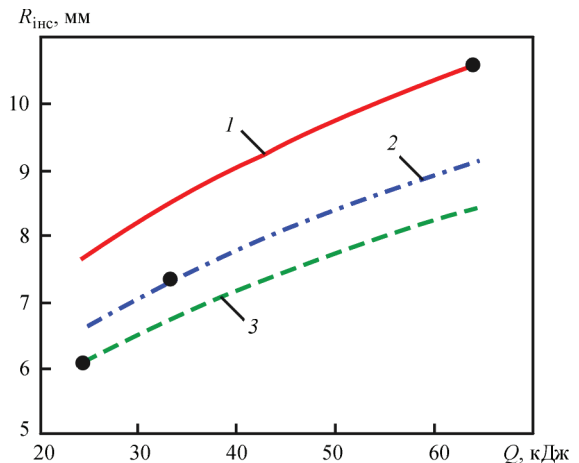


Рис. 7. Діаграма вибору радіуса заплечика робочого інструмента $R_{\text{інс}}$ для усталеного режиму зварювання при $P = 0,275$ кН, $v_{зв} = \text{const}$ та $\delta = 1,85$ мм: 1 — $\omega = 800$; 2 — 1250; 3 — 1600 об/хв; ● — значення Q з аналізу рис. 5

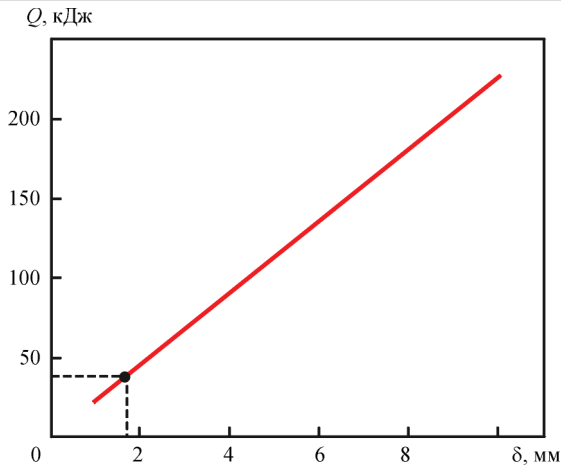


Рис. 8. Залежність потрібної кількості енергії Q за (5) для усталеного процесу зварювання від товщини металу δ

них властивостях. Отримані якісні залежності підтверджені експериментом: оптимальні умови зварювання скоріш досягаються при збільшенні ω і зниженні P .

Разом з цим слід очікувати визначеного впливу на технологічні характеристики при досягненні оптимального режиму зварювання з боку хімічного та фазового складу сплаву. Сумарний внесок можна оцінити через кореляційні співвідношення теплових фізичних властивостей.

За критерієм подібності ψ можна визначити необхідну енергію для зварювання в залежності від товщини пластини δ [17]:

$$\psi = \frac{N}{\lambda T \delta}, \quad (5)$$

де N — характеристика, подібна Q з (3); λ — теплопровідність; δ — товщина кромок металу; T — температура в зоні зварювання, К.

За співвідношенням (5) для конкретного сплаву за умов незмінних λ і T (оптимальна температура розігріву кромок при ЗТП) величина ψ змінюється в дуже малому діапазоні значень, що підтверджено даними [17] і експериментально в роботі. Враховуючи, що товщина металу, що зварюється, може змінюватися в широкому діапазоні, розрахунки $R_{\text{инс}}$ обмежили товщинами від 1 до 10 мм, що є найбільш поширеними в промисловості.

Після підстановки в (5) постійних характеристик λ , T і ψ (прийняли постійною величиною) отримали співвідношення між δ і Q для сталого режиму ЗТП (рис. 8). Враховуючи, що однакового рівня Q можна досягнути різною комбінацією ω і P , розрахунок енергії для зварювання за (5) в дійсності дає середнє значення для діапазону змін ω і P , що має визначене підтвердження. Так, для товщини $\delta = 1,85$ мм отримане значення енергії за співвідношенням (5) і середня величина Q за трьома режимами (40 кДж) мають достатньо якісний збіг.

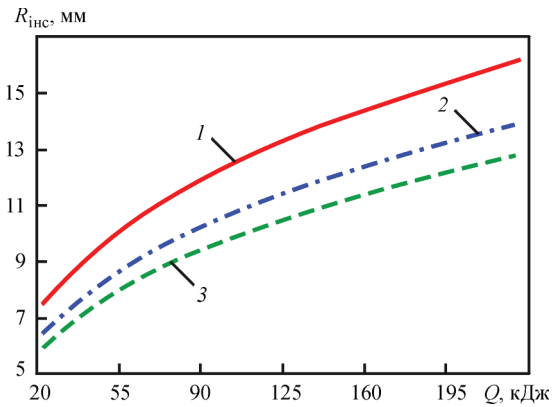


Рис. 9. Діаграма визначення рекомендованого радіуса заплечика робочого інструмента $R_{\text{инс}}$ для досягнення усталеного процесу зварювання при $P = 0,275$ кН, $v_{\text{зв}} = \text{const}$: 1 — $\omega = 800$; 2 — 1250; 3 — 1600 об/хв

Таким чином, наведена залежність (рис. 8) дозволяє визначити оптимальні умови ЗТП для пластин різної товщини. Наприклад, для $\delta = 3$ мм необхідна величина теплової енергії повинна складати значення порядку 70 кДж. Далі за цим значенням енергії для конкретного устаткування з визначеною потужністю оцінюють оптимальну частоту обертання робочого інструмента та відповідний радіус заплечика.

Враховуючи, що побудоване співвідношення $R_{\text{инс}} = f(Q)$ (рис. 7) стосується лише товщини кромок 1,85 мм, на рис. 9 наведено більш узагальнений приклад, коли $1 < \delta < 10$ мм.

Разом з цим, побудована діаграма (рис. 9) в дійсності відповідає умовам постійної сили притискання (0,275 кН), хоча оптимальний рівень Q для зварювання (ЗТП) визначається комбінацією ω і P .

Перевірку виконання залежності (рис. 9) було здійснено експериментально. Так, за умов постійної сили притискання (0,275 кН) для зварювання кромок товщиною 3 мм при $\omega = 1250$ об/хв радіус інструмента повинен знаходитись в інтервалі 9...10 мм, а для частоти 1600 об/хв — приблизно 8...9 мм.

За умов, коли обґрунтована необхідність пошуку оптимального режиму зварювання заснована на зміні сили притискання робочого інструмента, розрахунок $R_{\text{инс}}$ здійснюють за іншою діаграмою, для конкретного значення P .

Таким чином, за наведеними оцінками стає можливим удосконалити процес пошуку оптимальних умов зварювання за технологією тертям з перемішуванням.

Висновки

1. На прикладі сплаву на основі алюмінію визначено основні умови досягнення ефекту постійного пом'якшення при ЗТП металевих матеріалів.

2. Визначено мінімальне значення температурного інтервалу пом'якшення металу при ЗТП.

3. Для різних товщин з'єднаних кромок розроблено методику вибору радіусу заплечика в залежності від співвідношення швидкості обертання та сили притискання робочого інструмента при ЗТП.

Список литературы

1. Thomas W. M., Nicholas E. D., Needham J. C. et al. (1991) *Friction Stir Butt Welding*. Int. Pat. Application № PCT/GB 92/02203; GB Pat. Application № 9125978.8. Publ. 1991.
2. Shneider J. A. (2007) Temperature distribution and resulting metal flow. *Friction stir welding and processing*, 37–49.
3. Макаров Э. Л., Королев С. А., Штрикман М. М., Кашук Н. М. (2010) Моделирование тепловых процессов при фрикционной сварке. *Сварка и диагностика*, **3**, 21–25.
4. Mishara R. S., Mahoney M. W. (2007) *Friction stir welding and processing*. Ohio, ASM International.
5. Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Подбельников С. В. (2008) Влияние параметров процесса сварки трением с перемешиванием на формирование швов соединений алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм. *Автоматическая сварка*, **10**, 27–30.
6. Song M., Kovacevic R. (2003) Numerical and Experimental Study of the Heat Transfer Process in Friction Stir Welding. *Proc. Ins. Mech. Eng., B, J. Eng. Manuf.*, IMECHE, **1**, 73–85.
7. Вакуленко І. О., Мітяєв О. А., Плітченко С. О. (2014) Про структурні перетворення при зварюванні тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. Запоріжжя, **1**, сс. 8–10.
8. Schneider J. A., Nunes A. C. (2004) Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld. *Metall. mater. trans.* **B**, **3**, 777–783.
9. Colligan K. (2003) *Tapered Friction Stir Welding Tool*. Int. Pat. Application 10/140,797; US, Pat. 6,669,075 B2.
10. Вакуленко І. О., Плітченко С. О., Наєждін Ю. Л. (2012) Використання технології зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпро, **41**, 230–233.
11. Вакуленко І. О., Плітченко С. О., Наєждін Ю. Л. (2012) *Спосіб зварювання тертям з перемішуванням сплавів на основі алюмінію*. Україна, Пат. 75698, МПК В23К 1/00; заявник і патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. U201206529.
12. Reynolds A. P., Shneider A. P. (2007) Microstructure development in aluminum alloy friction stir welds. *Friction stir welding and processing*, 51–70.
13. Вакуленко І. А., Большаков В. И. (2008) *Морфология структуры и деформационное упрочнение стали*. Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет.
14. Hayes R. W., Hayes W. C. (1982) On the mechanism of delayed discontinuous plastic flow in an age-hardened nickel alloy. *Acta Metallurgica*, **30**, 1295–1301.
15. Виль В. И. (1970) *Сварка металлов трением*. Ленинград, Машиностроение.
16. Vakulenko I. O., Plitchenko S. O. (2017) Determination activation energy of friction stir welding. *Welding and related technologies (23–26 May 2017, Kyiv, Ukraine)*. Kyiv, pp. 54–58.
17. Ерохин А. А. (1973) *Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности*. Москва, Машиностроение.

References

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham, J.S. et al. (1991) *Friction stir butt welding*. Int. Pat. Appl. PCT/GB 92/02203; GB Pat. Appl. 9125978.8. Publ. 1991.
2. Schneider, J.A. (2007) Temperature distribution and resulting metal flow: *Friction stir welding and processing*, 37-49.

3. Makarov, E.L., Korolyov, S.A., Shtrickman, M.M., Kashchuk, N.M. (2010) Modeling of thermal processes in friction welding. *Svarka i Diagnostika*, **3**, 21-25 [in Russian].
4. Mishara, R.S., Mahoney, M.W. (2007) *Friction stir welding and processing*. Ohio, ASM International.
5. Poklyatsky, A.G., Ishchenko, A. Ya., Podielnikov, S.V. (2008) Influence of friction stir welding process parameters on weld formation in welded joints of aluminium alloys 1.8-2.5 mm thick. *The Paton Welding J.*, **10**, 22-25.
6. Song, M., Kovacevic, R. (2003) Numerical and experimental study of the heat transfer process in friction stir welding. *In: Proc. Ins. Mech. Eng., B.J. Eng. Manuf.*, IMECHE, **1**, 73-85.
7. Vakulenko, I.O., Mityaev, O.A., Plitchenko, S.O. (2014) On structure transformations in friction stir welding of aluminium alloy. *In: New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*. Zaporizhzhya, **1**, 8-10 [in Ukrainian].
8. Schneider, J.A., Nunes, A.C. (2004) Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld. *Metall. Mater. Trans.* **B**, **3**, 777-783.
9. Colligan, K. (2003) *Tapered friction stir welding tool*. Int. Pat. Appl. 10/140,797; US Pat. 6,669,075 B2. Publ. 30.12.2003.
10. Vakulenko, I.O., Plitchenko, S.O., Nadezhdin, Yu.L. (2012) Application of friction stir welding technology of aluminium alloy. *Visnyk Dniprop. Nats. Zalizn. Transport. Univ. V. Lazaryana*, **41**, 230-233 [in Ukrainian].
11. Vakulenko, I.O., Plitchenko, S.O., Nadezhdin, Yu.L. (2012) *Method of friction stir welding of aluminium-based alloys*. Ukraine Pat. 75698, Int. Cl. B23K 1/00. Fill. 29.05.12; Publ. 10.12.12 [in Ukrainian].
12. Reynolds, A.P., Schneider, A.P. (2007) Microstructure development in aluminum alloy friction stir welds. *In: Friction stir welding and processing*, 51-70.
13. Vakulenko, I.A., Bolshakov, V.I. (2008) *Morphology of structure and strain hardening of steel*: Monography. Dnepropetrovsk, DNU [in Russian].
14. Hayes, R.W., Hayes, W.C. (1982) On the mechanism of delayed discontinuous plastic flow in an age-hardened nickel alloy. *Acta Metallurgica*, **30**, 1295-1301.
15. Vill, V.I. (1970) *Friction welding of metals*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
16. Vakulenko, I.O., Plitchenko, S.O. (2017) Determination activation energy of friction stir welding. *In: Proc. of 9th Intern. Conf. of Young Scientists on Welding and Related Technologies (23–26 May 2017, Kyiv, Ukraine)*. Kyiv, 54-58.
17. Erokhin, A.A. (1973) *Fundamentals of fusion welding. Physical-chemical principles*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

И. А. Вакуленко, С. А. Плитченко

Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта имени
академика В. Лазаряна. 49010, г. Днепр, ул. Лазаряна, 2.
E-mail: plit4enko@ukr.net

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ СПЛАВА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

На примере алюминиевого сплава предлагается методика определения параметров процесса соединения пластин по технологии сварки трением с перемешиванием. В процессе исследований при различных соотношениях частоты вращения рабочего инструмента и нормального прижима к соединяемым кромок определен характер разогрева металла. Из анализа характера повышения температуры разогрева соединяемых кромок определено минимальное значение температурного интервала при реализации технологии сварки трением с перемешиванием. По анализу полученных экспе-

риментальных данных предлагается концепция определения основных параметров процесса сварки. Библиогр. 17, рис. 9.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; тепловая энергия; рабочий инструмент; режимы сварки; сплавы на основе алюминия; оптимальная температура

I. O. Vakulenko, S. O. Plitchenko

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2 Lazarayn Str., Dnipro, 49010. E-mail: plit4enko@ukr.net

DETERMINATION OF PARAMETERS OF FRICTION STIR WELDING MODE OF ALUMINUM-BASED ALLOY

A procedure is proposed for determination of parameters of process of plates joining using friction stir welding technology by the example aluminum alloy. A nature of metal heating was determined in the process of investigation of working tool rotation at different relationships of frequencies and normal pressing to joined edges. A minimum value of temperature interval in realizing of friction stir welding technology was determined from the analysis of nature of increase of heating temperature of edges being joined. Based on the analysis of received experimental data a concept of determination of main parameters of welding process was proposed. 17 Ref., 9 Fig.

Keywords: friction stir welding, heat energy, working tool; welding mode, aluminum-based alloys, optimum temperature

Поступила в редакцию 23.02.2018

ДЕВЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Украина, Одесса, отель «Курортный»
10 – 14 сентября 2018 г.



Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ
Международная Ассоциация «Сварка»

Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и вместе с тезисами доклада направить ее в Оргкомитет до 20 июня 2018 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов.

Сборники трудов восьми предыдущих конференций «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» на сайте:
<http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>

Математическое моделирование:

- процессов переноса энергии, импульса, массы и заряда в сварочных дугах;
- тепловых, электромагнитных, гидродинамических и массообменных процессов;
- напряженно-деформированного состояния сварных конструкций;
- кинетики твердофазных превращений в зоне термического влияния;
- кристаллизации металла сварного шва и образования химической неоднородности;
- формирования сварного шва, нагрева, плавления и переноса электродного металла;
- взаимодействия высококонцентрированных источников энергии со свариваемым металлом;
- идентификации дефектов при неразрушающих методах контроля сварных соединений.

Информационные технологии в сварке и родственных процессах

Контрольные даты

Подача заявок на участие и тезисов докладов	до 20.06.2018 г.
Рассылка второго информационного сообщения и подтверждение участия	до 12.07.2018 г.
Оплата регистрационного взноса	до 11.09.2018 г.

Оргкомитет

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины,
ул. Казимира Малевича 11,
г. Киев, 03680, Украина;
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26
E-mail: journal@paton.kiev.ua

<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2018>