

---

# МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

---

УДК 621.791.14

С. О. ПЛІТЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта plit4enko@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ ІЗ ПЕРЕМІШУВАННЯМ

**Мета.** Дослідження передбачає удосконалення методики визначення оптимальної величини радіуса заплечика спеціального інструмента під час зварювання тертям із перемішуванням (ЗТП) сплавів на основі алюмінію та його зміну залежно від зміни товщини основного металу. **Методика.** Процес зварювання тертям із перемішуванням виконаний на спеціально розробленому обладнанні. Матеріалом для досліджень були пластини товщиною 1,85 мм зі сплаву алюмінію АМг3 з хімічним вмістом легувальних елементів у межах марочного складу. Температуру в зоні зварювання та тиск від інструмента на кромки зварного з'єднання визначали за допомогою спеціально розробленого дослідного стенда. Силу притискання робочого інструмента до основного металу під час зварювання вимірювали за допомогою динамометра типу ДС-0,1 з індикаторною голівкою. **Результати.** У процесі досліджень за різних співвідношень частоти обертання робочого інструмента та нормального притискання до з'єднуваних кромок визначений ступінь розігріву металу, а також якість формування зварного з'єднання. З'ясований вплив технологічних параметрів процесу ЗТП на температуру розігріву металу в зоні дії заплечика робочого інструмента. **Наукова новизна.** З експериментальних досліджень було визначено, що температура в зоні зварювання залежить від швидкості обертання робочого інструмента та величини його тиску на зварюваний метал. Збільшення частоти обертання інструмента дозволяє зменшувати його тиск, що дає змогу більш ефективно та якісно проводити процес зварювання. Встановлена можливість отримувати більш якісні зварні з'єднання за температури, яка приблизно дорівнює  $0,7T_{пл}$ , визначений оптимальний діапазон температур у зоні зварювання. **Практична значимість.** Визначені умови досягнення ефекту постійного пом'якшення під час зварювання тертям із перемішуванням та оптимальні температури в зоні зварювання для досліджуваного сплаву. Здійснений розрахунок основних технологічних параметрів робочого інструмента та визначений їх вплив на генерування теплової енергії в зоні зварювання. На основі теплового аналізу процесу зварювання розроблена методика визначення технологічних параметрів робочого інструмента та частоти його обертання залежно від товщини зварюваного металу.

**Ключові слова:** зварювання тертям із перемішуванням; тепла енергія; робочий інструмент; режими зварювання; сплави на основі алюмінію; оптимальна температура

### Вступ

Одним із напрямків розвитку залізничного транспорту є впровадження нових металевих сплавів для виготовлення різноманітних конструкцій. До їх головних переваг належать невелика питома вага, міцність, корозійна стійкість, легкість вторинної переробки та ін.

Сплави на основі алюмінію постійно вдос-

конаються, поліпшуються їх механічні та фізичні властивості, розробляються інноваційні способи обробки.

Під час виготовлення конструкцій складних форм традиційно застосовуване зварювання супроводжується певними труднощами. Здатність до зварювання алюмінієвих сплавів ускладнюється через утворення тугоплавких плівок, високу теплопровідність і рідкотекучість.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

чість, схильність до утворення гарячих тріщин, порожнин тощо.

Практично всі вказані недоліки можна усунути або суттєво зменшити, якщо застосувати зварювання без розплавлення металу. Такий спосіб є різновидом зварювання тиском (рис. 1), з локалізацією в приповерхневих шарах кромки тепловиділення від перетворення механічної енергії (сил тертя) в теплову.

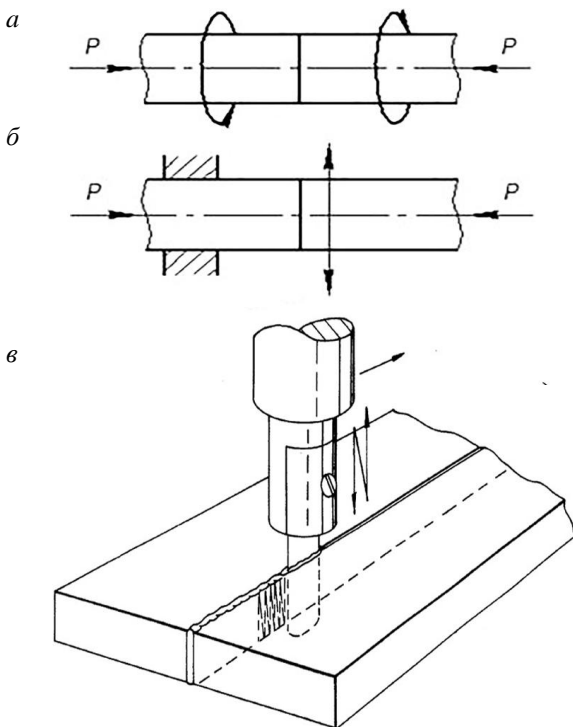


Рис. 1. Схеми процесу зварювання тертям:

*a* – традиційне; *б* – вібротертям; *в* – листових заготовок за допомогою леза; *P* – сила притискання

Аналогічно, під час зварювання тертям із перемішуванням (ЗТП) [10], джерелом тепла є сили тертя, що виникають між поверхнями зварюваних кромки та робочою частиною спеціального інструмента [5, 12–17].

До технологічних параметрів процесу ЗТП належать:

- частота обертання зварювального інструмента навколо власної осі;
- швидкість зварювання (швидкість переміщення зварювального інструмента вздовж зварюваних кромки);
- кут нахилу інструмента відносно нормалі до зварюваної поверхні;
- сила притискання інструмента до кромки;
- геометричні розміри та форма робочої частини зварювального інструмента.

Наведені характеристики мають різний вплив на процес зварювання і якість зварного з'єднання [7, 13]. Разом із цим висока чутливість процесу ЗТП до зміни технологічних параметрів ускладнює підтримку стабільних умов зварювання. Наприклад, частота обертання інструмента та швидкість його переміщення вздовж кромки дозволяють у широкому діапазоні змінювати умови розігріву металу та впливати на якість з'єднання. Зовсім інша справа з геометричними розмірами та формою інструмента. Складна форма елементів робочого інструмента суттєво ускладнює його використання в разі зміни номенклатури виробів за умов зварювання тертям із перемішуванням (рис. 2, *a*).

Кожна з частин інструмента забезпечує не тільки перетворення механічної енергії в теплову, але й специфічний її розподіл по перетину зварного шва [17]. Дія заплечика спричиняє до 90 % від загальної енергії [12], решта припадає на штир. Наведене співвідношення свідчить про основний вплив з боку заплечика на стабільність процесу ЗТП.

У деяких випадках робочі поверхні інструмента можуть мати нарізку, канавки, спіралі [11] тощо, що дозволяє на високому рівні руйнувати окисну плівку поверхонь алюмінієвих сплавів та підвищувати ступінь дифузії між зварюваним металом, що в свою чергу поліпшує механічні властивості з'єднання [1, 12, 4, 15].

Штир робочого інструмента призначений для розподілу теплової енергії по товщині зварного з'єднання, дроблення окисних плівок торців зварюваних поверхонь та їх активації, забезпечення дифузії під час зварювання.

Форма штиря робочого інструмента може значно змінюватися залежно від його діаметра, кута нахилу інструмента під час зварювання, товщини основного металу та його хімічного складу, що в свою чергу буде впливати на якість зварного з'єднання. Подібно до поверхні штиря заплечика може мати нарізку, яка допомагає керувати потоком пластифікованого металу і направляти його на ущільнення певних ділянок шва, що зменшує вірогідність появи непровару кореня шва.

Порівняно з технологіями часткового або повного розплавлення, використання зварю-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

вання тертям із перемішуванням дозволяє суттєво зменшити ступінь перегріву металу в зоні термічного впливу, а також деформації зварного з'єднання й виробу в цілому, які виникають унаслідок цього [1, 2, 7].

**Мета**

Зважаючи на викладене, за мету статті ми ставимо вдосконалення методики визначення оптимальної величини радіуса заплечика спеціального інструмента залежно від зміни товщини основного металу.

**Методика**

Для досягнення поставленої мети здійснений процес ЗТП (рис. 2, а) на спеціально розробленому лабораторному устаткуванні з використанням різноманітних режимів зварювання [2, 6, 12, 17].

Зварювальний інструмент (рис. 2, б) був виготовлений із швидкорізальної сталі марки Р9, яка зберігає свої механічні властивості до температур початку плавлення сплавів на основі алюмінію. Інструмент пройшов спеціальну термообробку зміцнення.

З метою якісного заповнення металом шва вісь робочого інструмента розташовується під кутом  $1...3^\circ$  відносно нормалі до поверхні металу. Нормальне зусилля вибрано за умов занурення інструмента в заготівку на глибину до 10 % від товщини зварюваних кромок. Заплечик має діаметр 12 мм, штир конічної форми сягає в довжину 1,72 мм при діаметрі в основі 3,4 мм.

Швидкість обертання інструмента змінювали в інтервалі  $800...1600 \text{ хв}^{-1}$ , за сили притискування до пластин не вище 1,4 кН. Швидкість переміщення інструмента вздовж шва підтримували постійною – 50 мм/хв.

Матеріалом для випробувань були пластини товщиною 1,85 мм зі сплаву АМg3 із вмістом легувальних елементів у межах марочного складу.

Температуру та тиск від інструмента в зоні зварювання регулювали за умов спеціально розробленого стенда, який розташовувався на вертикально-фрезерному верстаті. Силу притискування робочого інструмента до кромок вимірювали динамометром типу ДС-0,1.

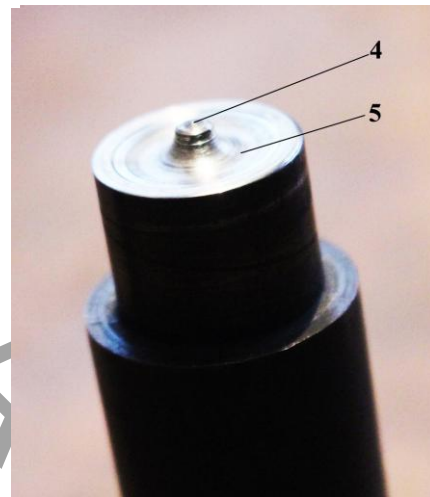
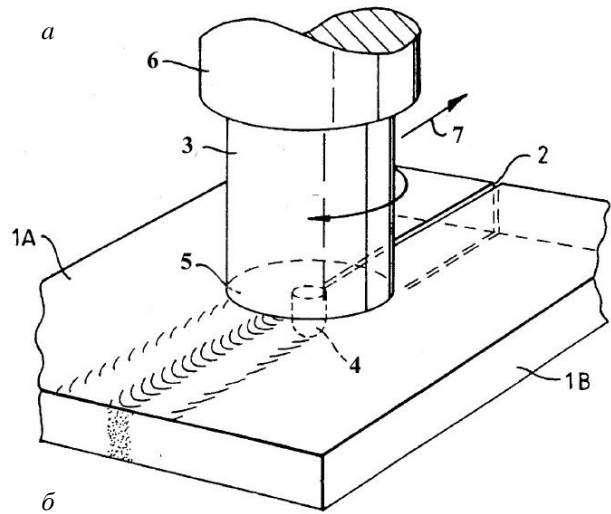


Рис. 2. Процес ЗТП двох заготовок (а) та робочий інструмент (б):

1А, 1В – заготовки; 2 – стик; 3 – робочий інструмент; 4 – штир; 5 – заплечик; 6 – джерело обертання (двигун); 7 – напрямок зварювання

Температуру розігріву металу вимірювали термопарами типу хромель-алюмель із розташуванням на різній відстані від осі зварного шва.

**Результати**

За різних співвідношень швидкості обертання робочого інструмента та його притискування до з'єднаних кромок змінюється ступінь розігріву металу.

На рис. 3 наведені результати дослідження впливу параметрів процесу ЗТП на температуру розігріву металу під заплечиком робочого інструмента.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

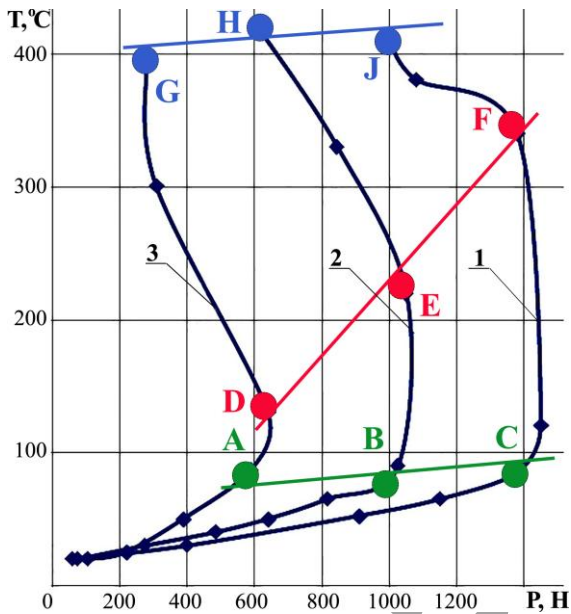


Рис. 3. Експериментальні криві залежності температури розігріву кромки сплаву під заплечиком від швидкості обертання  $\omega$  і сили притискування  $P$  робочого інструмента ( $V_{зв} = const$ );

1 –  $\omega = 800$  об/хв; 2 –  $\omega = 1250$  об/хв;

3 –  $\omega = 1600$  об/хв

З аналізу характеру співвідношення  $T = f(P)$  визначена оптимальна температура розігріву металу кромки. По-перше, якісно різний вигляд залежності відповідав зміні структурних перетворень у металі кромки. Незалежно від швидкості обертання інструмента й сили його притискування значення мінімальної температури коливалися у відносно вузькому інтервалі 70...85 °С (рис. 3, точки А, В, С). З урахуванням можливих неконтрольованих відхилень за підтримки стабільних умов процесу зварювання, для спрощення аналізу теплового балансу було прийняте середнє значення температури 76...78 °С, що відповідає моменту зміни характеру співвідношення.

Оцінка температури початку розвитку рекристалізації ( $T_p$ ) для однофазних металевих матеріалів ( $T_p = 0,4 \cdot T_{пл}$ , де  $T_{пл}$  – температура плавлення металу) показала достатньо якісний збіг зі значеннями 76...78 °С.

Детальний аналіз форми кривих  $T = f(P)$  (рис. 3), з урахуванням наявних якісних змін щодо структурних перетворень за умови гарячого обтискування свідчить, що від моменту

формування горизонтальної ділянки (А–D; В–Е; С–F) до різкого зниження зусилля притискування (точки D, E, F) процеси внутрішньої перебудови сплаву обумовлені розвитком динамічної полігонізації і рекристалізації.

Зважаючи на це, момент формування горизонтальної ділянки слід розглядати як обмеження щодо мінімальної температури процесу ЗТП, а різке зниження  $T$  – максимально допустимим значенням.

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

Досить складний характер одночасного впливу декількох технологічних параметрів процесу ЗТП на пластичні властивості вимагає оцінити потрібну енергію  $Q$  для нагріву металу до температури  $0,7T_{пл}$ . Величину  $Q$  визначали за співвідношенням типу [9], з урахуванням умов експерименту:

$$Q = R \cdot T \cdot (m \cdot \ln P - \ln \omega), \quad (1)$$

де  $\omega$  – частота обертання інструмента;  $P$  – сила притискування робочого інструмента;  $T$  – температура;  $R$  – силова характеристика;  $m$  – показник ступеня.

Розрахунок  $Q$  проводили за експериментальними даними (рис. 3) для пластин сплаву за умов сталого режиму:  $\omega = 13,3 \text{ с}^{-1}$  (800 хв<sup>-1</sup>),  $P = 1 \text{ кН}$ ;  $\omega = 20,8 \text{ с}^{-1}$  (1 250 хв<sup>-1</sup>),  $P = 0,59 \text{ кН}$  та  $\omega = 26,7 \text{ с}^{-1}$  (1 600 хв<sup>-1</sup>),  $P = 0,275 \text{ кН}$ . Температура в зоні кромки складала  $0,7T_{пл}$ . Результат оцінки  $Q$  від  $\omega$  для точок J, H, G наведений на рис. 4.

Наведений характер залежності (рис. 4) свідчить про досить складний одночасний вплив на  $Q$  з боку  $P$  і  $\omega$ . Ураховуючи це, потрібно оцінити вплив від якоїсь однієї характеристики. Результат зміни  $Q$  залежно від  $\omega$  за  $P = const$  (0,275 кН) наведений на рис. 5.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

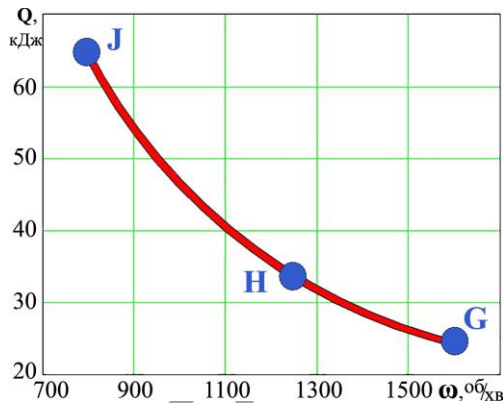


Рис. 4. Залежність  $Q$  від одночасного впливу  $\omega$  і  $P$  (точки J, H, G) за умов досягнення температури  $0,7 T_{пл}$

Аналіз отриманих результатів свідчить, що за умов постійної сили притискання зміна  $\omega$  в два рази призводить до зміни  $Q$  на рівні 10...12 %, що відповідає середньому значенню  $Q$  (рис. 4, точка G).

Отриманий результат впливу з боку  $\omega$  на  $Q$ , порівняно із силою притискання, має визначене підтвердження. Річ у тому, що інтервал зміни  $\omega$  складає 2 рази проти зміни  $P$  більше ніж 3,6 разів. Таким чином, під час експерименту був закладений різний ефект впливу від технологічних параметрів ЗТП на процеси розігріву з'єднуваних кромки.

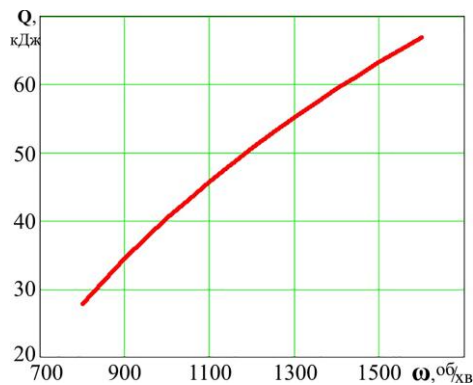


Рис. 5. Зміна  $Q$  залежно від  $\omega$  за  $P = 0,275$  кН

Сумісний аналіз розрахованих значень  $Q$  (рис. 4, 5) свідчить про необхідність визначення оптимальної енергії для зварювання тертям із перемішуванням і можливої залежності від геометричних розмірів робочого інструмента. Ураховуючи вплив заплечика на енергетичний баланс під час ЗТП, була зроблена спроба оцінити оптима-

льний діаметр заплечика робочого інструмента для різних товщин з'єднуваних кромки. Для цього використане співвідношення залежності теплового балансу процесу зварювання тертям від основних технологічних параметрів [3]:

$$N = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot p \cdot \omega \cdot R_{инс}^3, \quad (2)$$

де  $N$  – енергетична характеристика;  $\mu$  – коефіцієнт тертя;  $p$  – питомий нормальний тиск інструмента;  $\omega$  – кутова швидкість обертання;  $R_{инс}$  – радіус заплечика інструмента.

Зважаючи, що до співвідношення (2) входять незмінні величини, вираз слід спростити:

$$A = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot p, \quad (3)$$

де  $A$  – постійний коефіцієнт.

Тоді вираз (2) набуде вигляду:

$$N = A \cdot \omega \cdot R_{инс}^3. \quad (4)$$

За співвідношенням (4)  $R_{инс}$  дорівнює:

$$R_{инс} = \sqrt[3]{\frac{N}{A \cdot \omega}}. \quad (5)$$

Результати розрахунку  $R_{инс}$  за (5) із використанням експериментальних даних [8] та випадкових значень  $Q$  для досліджених інтервалів змін  $P$  і  $\omega$  наведені на рис. 6.

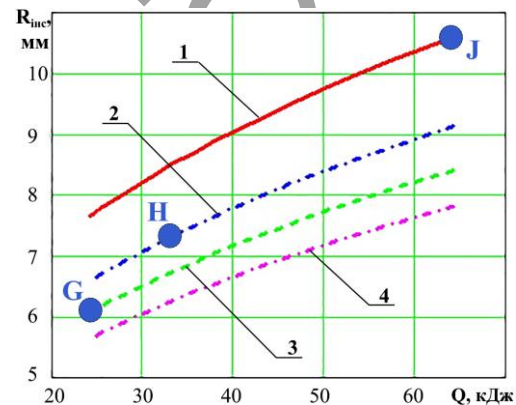


Рис. 6. Діаграма вибору радіуса заплечика робочого інструмента  $R_{инс}$  для  $P = 0,275$  кН, залежно від  $\omega$ :

1 – 800; 2 – 1 250; 3 – 1 600; 4 – 2 000 хв<sup>-1</sup>;  
● – експериментальні дані  $Q$  з рис. 4

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Аналіз результатів (рис. 6) свідчить про існування кореляції між енергією  $Q$  в зоні зварювання і величиною радіуса заплечика робочого інструмента  $R_{\text{інст}}$ . За підвищених частот обертання інструмента (рис. 6, криві 3 й 4), однакові значення  $Q$  досягаються в разі зменшення  $R_{\text{інст}}$ .

У процесі зварювання перебування інструмента під кутом  $1...3^\circ$  відносно нормалі до заготовки забезпечує необхідні умови заповнення металом зварювальної ванни. Очікувана нерівномірність розподілу температури по площині плями контакту (заплечика) має місце лише на початкових етапах до виходу на оптимальні умови зварювання. Після цього досягаються повністю гомогенні умови процесу виділення теплової енергії.

Під час проектування робочого інструмента потрібно враховувати, що надмірне збільшення діаметра заплечика призведе до підвищення навантаження на обладнання, небажаного збільшення ширини зварного шва, а також за умов використання підвищених частот обертання робочого інструмента може призвести до перегріву зварного з'єднання, що негативно позначиться на його механічних властивостях.

Окрім впливу наведених факторів, вибір режиму зварювання залежить від хімічного та фазового складу сплаву, морфології та розташування в матриці часток другої фази. Окремого значення набуває товщина кромок металу.

Для врахування впливу товщини зварюваного металу та його теплових властивостей на досягнення оптимальних умов пропонують використовувати критерій подібності [4]:

$$\psi = \frac{N}{\lambda \cdot T \cdot \delta}, \quad (6)$$

де  $N$  – характеристика, подібна до  $Q$  з (2);  $\lambda$  – теплопровідність;  $\delta$  – товщина кромок металу;  $T$  – температура в зоні зварювання.

За співвідношенням (6) для конкретного сплаву, за умов незмінних  $\lambda$  і  $T$  (оптимальна температура розігріву кромок під час ЗТП), величина  $\psi$  змінюється в дуже малому діапазоні значень, що підтверджено даними [4] й експериментально в цій роботі. Ураховуючи, що товщина зварюваного металу може змінюватися в широкому діапазоні, розрахунки  $R_{\text{інст}}$  обмежили

товщинами від 1 до 10 мм, що є найбільш поширеними в промисловості.

Величину енергії  $Q$  для будь-якої товщини основного металу оцінюють за наступним виразом:

$$Q = \psi_{\text{сп}} \cdot \lambda \cdot T \cdot \delta. \quad (7)$$

Співвідношення (7) з урахуванням (8)

$$B = \psi_{\text{сп}} \cdot \lambda \cdot T, \quad (8)$$

де  $B$  – постійна, матиме вигляд:

$$Q = B \cdot \delta. \quad (9)$$

Ураховуючи (1), однаковий рівень  $Q$  може бути досягнутий різною комбінацією  $\omega$  і  $P$ . Тоді за (9)  $Q$  в дійсності є середнім значенням для діапазону змін  $\omega$  і  $P$ , що має визначене підтвердження. Так, для товщини  $\delta = 1,85$  мм, отримане значення енергії за співвідношенням (9) і середня величина  $Q$  за трьома режимами (40 кДж) мають достатньо якісний збіг (рис. 7).

Наведена залежність дозволяє визначити оптимальні умови зварювання тертям із перемішуванням для пластин різної товщини. Наприклад, для  $\delta = 3$  мм потрібна величина теплової енергії повинна складати значення порядку 70 кДж. Далі за цим значенням енергії, для конкретного устаткування з визначеною потужністю, визначають оптимальну частоту обертання робочого інструмента та відповідний радіус заплечика.

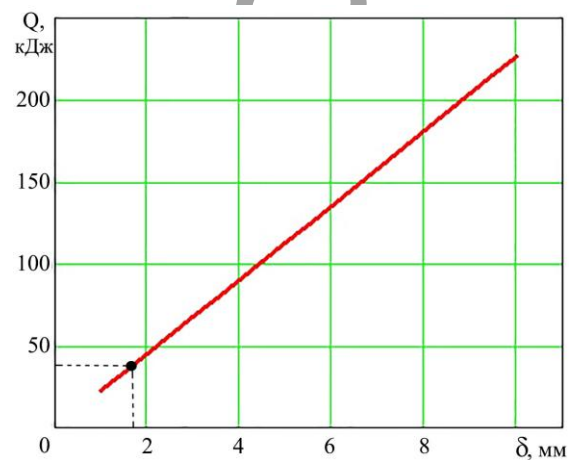


Рис. 7. Залежність потрібної кількості енергії  $Q$  за (9) для усталеного процесу зварювання від товщини металу  $\delta$

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Визначення величини  $R_{\text{інс}}$ , за умов одночасного врахування сили притискання інструмента, частоти обертання та товщини металу, пропонуємо за співвідношенням:

$$R_{\text{інс}} = \sqrt[3]{\frac{B \cdot \delta}{A \cdot \omega}} \quad (10)$$

Результати розрахунку за (10) наведені для товщин  $1 < \delta < 10$  мм на рис. 8.

Побудована діаграма за (10) відповідає умовам постійної сили притискання (0,275 кН), хоча оптимальний рівень  $Q$  для зварювання (ЗП) визначається комбінацією  $\omega$  і  $P$ .

Перевірку виконання залежності (рис. 8) здійснено експериментально. Так, за умов постійної сили притискання (0,275 кН) для зварювання кромки товщиною 3 мм в разі  $\omega = 1250 \text{ хв}^{-1}$ , радіус інструмента повинен складати інтервал 9...10 мм, а для частоти  $1600 \text{ хв}^{-1}$  – приблизно 8...9 мм.

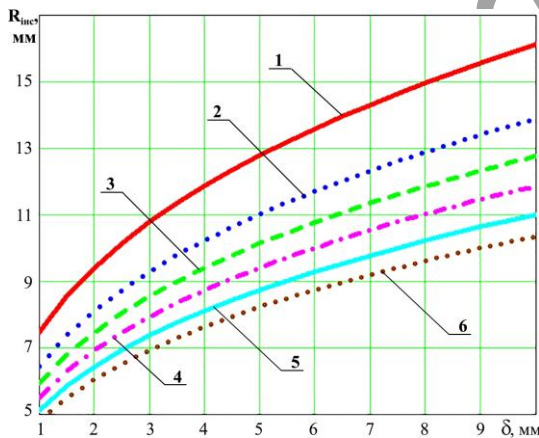


Рис. 8. Діаграма визначення оптимального радіуса заплечика робочого інструмента  $R_{\text{інс}}$  для досягнення усталеного процесу зварювання за

$$P = 0,275 \text{ кН}, V_{\text{зв}} = \text{const} :$$

1 – 800; 2 – 1 250; 3 – 1 600; 4 – 2 000; 5 – 2 500;

6 – 3 000  $\text{хв}^{-1}$ .

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

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

### Наукова новизна та практична значимість

Із досліджень був визначений вплив швидкості обертання робочого інструмента та величини його притискання до зварюваних кромки на температуру в зоні шва. Збільшення  $\omega$  дозволяє зменшити тиск робочого інструмента під час зварювання. Встановлені умови досягнення надпластичного стану металу в зоні зварювання та визначений оптимальний діапазон температур.

### Висновки

1. Встановлена можливість отримувати під час зварювання тертям із перемішуванням зварні з'єднання за температур в інтервалі  $0,7T_{\text{пл}}$ .
2. За різних співвідношень швидкості обертання робочого інструмента й притискання до з'єднуваних кромки визначені умови досягнення ефекту постійного пом'якшення сплаву.
3. Здійснений розрахунок основних технологічних параметрів робочого інструмента й визначений їх вплив на виникнення потрібної теплової енергії в зоні зварювання.
4. На основі аналізу процесу зварювання розроблена методика визначення технологічних параметрів робочого інструмента залежно від товщини зварюваного металу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вакуленко, І. О. Використання технології зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву / І. О. Вакуленко, С. О. Плітченко, Ю. Л. Надеждін // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 41. – С. 230–233.
2. Вакуленко, І. О. Про структурні перетворення при зварюванні тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву / І. О. Вакуленко, О. А. Мітяєв, С. О. Плітченко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2014. – № 1. – С. 8–10.
3. Виль, В. И. Сварка металлов трением / В. И. Виль. – Ленинград : Машиностроение, 1970. – 178 с.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

4. Ерохин, А. А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности / А. А. Ерохин. – Москва : Машиностроение, 1973. – 448 с.
5. Моделирование тепловых процессов при фрикционной сварке / Э. Л. Макаров, С. А. Королев, М. М. Штрикман, Н. М. Кашук // Сварка и диагностика. – 2010. – № 3. – С. 21–25.
6. Пат. 75698 Україна, МПК В 23 К 1/00. Спосіб зварювання тертям з перемішуванням сплавів на основі алюмінію / Вакулєнко І. О., Плітченко С. О., Наєждін Ю. Л. ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № U201206529 ; заявл. 29.05.12 ; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23. – 4 с.
7. Покляцкий, А. Г. Некоторые преимущества стыковых соединений тонколистовых деформируемых алюминиевых сплавов АМг5М и АМг6М, полученных сваркой трением с перемешиванием, по сравнению с ТИГ / А. Г. Покляцкий, И. Н. Клочков, С. И. Мотрунич // Автоматическая сварка. – 2015. – № 7. – С. 18–23.
8. Determination activation energy of friction stir welding / I. O. Vakulenko, S. O. Plitchenko // Welding and related technologies : Proc. of 9th Intern. Conf. of young scientists (23–26 May 2017, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2017. – P. 54–58.
9. Hayes, R. W. On the mechanism of delayed discontinuous plastic flow in an age-hardened nickel alloy / R. W. Hayes, W. C. Hayes // Acta Metallurgica. – 1982. – Vol. 30. – Iss. 7. – P. 1295–1301. doi: 10.1016/0001-6160(82)90148-1
10. Int. Pat. Application № PCT/GB 92/02203; GB Pat. Application № 9125978.8. Friction Stir Butt Welding / Thomas W. M., Nicholas E. D., Needham J. C. et al. – Publ. 1991.
11. Int. Pat. Application № 10/140,797; US Pat. № 6,669,075 B2. Tapered Friction Stir Welding Tool / Colligan K. – Publ. 30.12.2003.
12. Investigation of stationary shoulder friction stir welding of aluminum alloy 7075-T651 / Dongxiao Li, Xinqi Yang, Lei Cui, Fangzhou He, Xu Zhang // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 222. – P. 391–398. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.03.036
13. Friction stir welding and processing / Editors Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney. – Ohio : ASM International, 2007. – 360 p.
14. Modeling heat transfer during friction stir welding using a meshless particle method / Yihua Xiao, Haifei Zhan, Yuantong Gu, Qinghua Li // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 104. – P. 288–300. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.047
15. Numerical modeling for the effect of pin profiles on thermal and material flow characteristics in friction stir welding / Hao Su, Chuan Song Wu, Marcel Bachmann, Michael Rethmeier // Materials & Design. – 2015. – Vol. 77. – P. 114–125. doi: 10.1016/j.matdes.2015.04.012
16. Shneider, J. A. Temperature distribution and resulting metal flow / J. A. Shneider // Friction stir welding and processing. – Ohio : ASM International, 2007. – P. 37–49.  
Thermo-Mechanical Modeling of Friction-Stir Welding Tool Used in Aluminum Alloys Joints / J. F. Villegas, J. V. Dominguez, G. V. Ochoa, J. Unfried-Silgado // Contemporary Engineering Sciences. – 2017. – Vol. 10. – Iss. 34. – P. 1659–1667. doi: 10.12988/ces.2017.711156

С. А. ПЛИТЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта plit4enko@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

**Цель.** Исследование предусматривает усовершенствование методики определения оптимальной величины радиуса заплечика специального инструмента при сварке трением с перемешиванием (СТП) сплавов на основе алюминия и его изменение в зависимости от изменения толщины основного металла. **Методика.** Процесс сварки трением с перемешиванием выполнялся на специально разработанном оборудовании. Материалом для исследований были пластины толщиной 1,85 мм из сплава алюминия АМг3 с химическим со-



## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

держанием легирующих элементов в пределах марочного состава. Сварочный инструмент изготавливался с использованием быстрорежущей стали марки Р9 и подвергался специальной термообработке. Температуру в зоне сварки и давление от инструмента на кромки сварного соединения определяли с помощью специально разработанного исследовательского стенда. Сила прижима рабочего инструмента к основному металлу при сварке измерялась с помощью динамометра типа ДС-0,1 с индикаторной головкой. **Результаты.** В процессе исследований при различных соотношениях частоты вращения рабочего инструмента и нормального прижима к соединительным кромкам определили степень разогрева металла, а также качество формирования сварного соединения. Определили влияние технологических параметров процесса СТП на температуру разогрева металла в зоне действия заплечика рабочего инструмента. **Научная новизна.** Из экспериментальных исследований было определено, что температура в зоне сварки зависит от скорости вращения рабочего инструмента и величины его давления на свариваемый металл. Увеличение частоты вращения инструмента позволяет уменьшать его давление, что дает возможность более эффективно и качественно проводить процесс сварки. Установлена возможность получать более качественные сварные соединения при температуре, примерно равной  $0,7 T_{пл}$ , определен оптимальный диапазон температур в зоне сварки. **Практическая значимость.** Определены условия достижения эффекта постоянного смягчения при сварке трением с перемешиванием и оптимальные температуры в зоне сварки для исследуемого сплава. Осуществлен расчет основных технологических параметров рабочего инструмента и определено их влияние на генерирование тепловой энергии в зоне сварки. На основе теплового анализа процесса сварки разработана методика определения технологических параметров рабочего инструмента и частоты его вращения в зависимости от толщины свариваемого металла.

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

S. O. PLITCHENKO

Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail plit4enko@ukr.net, ORCID 0000-0002-0613-2544.

## PROCEDURE FOR DETERMINING PROCESS CHARACTERISTICS OF FRICTION STIR WELDING

**Purpose.** Improvement of the procedure for determining the optimum radius of the shoulder of a special tool for FSW of aluminum alloys and its change depending on the variations of base metal thickness. **Methodology.** The friction stir welding process was carried out on specially designed equipment. The material for the studies were 1.85 mm thick plates made of aluminum alloy AMg3 with a chemical content of alloying elements within the range of the brand composition. The temperature in the welding zone and the pressure from the tool on the edges of the welded joint were determined using a specially designed research stand. The pressing force of the tool to the base metal during welding was measured with a dynamometer type DC-0.1 with the indicator head. **Findings.** During the research, the degree of metal heating and the quality of the welded joint formation were determined at various ratios of the rotation frequency of the working tool and the normal pressure to the joining edges. The research allowed determining the influence of FSW process parameters on the temperature of metal heating in the action zone of the working tool shoulder. **Originality.** The experimental studies allowed to determine the effect of the working tool rotation speed and the magnitude of its pressure on the welded metal during welding on the temperature in the weld zone. Increasing the tool rotation frequency allows to reduce pressure of the working tool during welding, which results in more efficient and high-quality welding process. It has been established that it is possible to obtain better welded joints at a temperature of about  $0.7 T_m$  and to determine the optimal temperature range in the welding zone. **Practical value.** The study resulted in determination of the conditions for achieving the permanent softening effect during friction stir welding and the optimum temperatures in the welding zone for the tested alloy. The main technological parameters of the working tool are calculated and their influence on the generation of thermal energy in the welding zone is determined. The thermal analysis of the welding process resulted in development of the procedure for determining the technological parameters of the working tool and its rotation frequency depending on the weld metal thickness.

*Keywords:* friction stir welding; thermal energy; working tool; welding modes; aluminium alloys; optimum temperature

## REFERENCES

1. Vakulenko, I. O., Plitchenko, S. O., & Nadegdin, Y. L. (2012). Use of technology of friction stir welding for aluminum alloys. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*, 41, 230-233. (in Ukrainian)
2. Vakulenko, I. O., Mitiaiev, O. A., & Plitchenko, S. O. (2014). Pro strukturni peretvorennia pry zvariuvanni tertiam z peremishuvanniam aliuminiievoho splavu. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashy-?obuduvanni*, 1, 8-10. (in Ukrainian)
3. Vyll, V. Y. (1970). *Svarka metallov trenyem*. Leningrad: Mashinostroyeniye. (in Russian)
4. Yerokhin, A. A. (1973). *Osnovy svarki plavlениem. Fiziko-khimicheskie zakonomernosti*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
5. Makarov, E. L., Korolev, S. A., Shtrikman, M. M., Kashchuk, N. M. (2010). Modelirovanie teplovykh protsessov pri friktsionnoy svarke. *Svarka i diagnostika*, 3, 21-25. (in Russian)
6. Vakulenko, I. O., Plitchenko, S. O., & Nadegdin, Y. L. (2012). *UA Patent No. 75698*. Kyiv: Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent). (in Ukrainian)
7. Poklyatskiy, A. G., Klochkov, I. N., & Motrunich, S. I. (2015). Nekotorye preimushchestva stykovykh soedineniy tonkolistovykh deformiruemyykh alyuminievyykh splavov AMg5M i AMg6M, poluchennykh svarkoy treniem s peremeshivaniem, po sravneniyu s TIG. *Avtomaticheskaya svarka*, 7, 18-23. (in Russian)
8. Vakulenko, I. O., Plitchenko, S. O. (2017). Determination activation energy of friction stir welding. *Proceedings of the 9th International Conference Young Scientists Welding and related Technologies, May 23-26, 2017*, 54-58. (in English)
9. Hayes, R. W., & Hayes, W. C. (1982). On the mechanism of delayed discontinuous plastic flow in an age-hardened nickel alloy. *Acta Metallurgica*, 30 (7), 1295-1301. doi: 10.1016/0001-6160(82)90148-1 (in English)
10. Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C. & et al. (1991). *GB Patent No. 9125978.8* (Int. Pat. Application № PCT/GB 92/02203). (in English)
11. Colligan, K. (2003). *US Patent No. 6,669,075 B2* (Int. Pat. Application № 10/140,797). (in English)
12. Li, D., Yang, X., Cui, L., He, F., & Zhang, X. (2015). Investigation of stationary shoulder friction stir welding of aluminum alloy 7075-T651. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 391–398. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.03.036 (in English)
13. Mishara, R. S., & Mahoney, M. W. (Eds.) (2007). *Friction stir welding and processing*. Ohio: ASM International. (in English)
14. Xiao, Y., Zhan, H., Gu, Y., & Li, Q. (2017). Modeling heat transfer during friction stir welding using a meshless particle method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 288-300. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.047 (in English)
15. Su, H., Wu Song, C., Bachmann, M., & Rethmeier, M. (2015). Numerical modeling for the effect of pin profiles on thermal and material flow characteristics in friction stir welding. *Materials & Design*, 77, 114-125. doi: 10.1016/j.dt.2015.05.001 (in English)
16. Shneider, J. A. (2007). Temperature distribution and resulting metal flow. In J. A. Shneider (Ed.), *Friction stir welding and processing*, (37-49). Ohio: ASM International. (in English)
17. Villegas, J. F., Dominguez, J. V., Ochoa, G. V., & Unfried-Silgado, J. (2017). Thermo-Mechanical Modeling of Friction-Stir Welding Tool Used in Aluminum Alloys Joints. *Contemporary Engineering Sciences*, 10 (34), 1659-1667. doi: 10.12988/ces.2017.711156 (in English)

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. И. А. Вакуленком (Україна)

Надійшла до редколегії: 21.03.2018

Прийнята до друку: 22.04.2018