

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ  
ПОЛІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ З  
ПЕРЕМІШУВАННЯМ**

## ЗМІСТ

Анотація	3
Вступ	4
Розділ I. Основні відомості	6
I.1. Суть способу ЗТП	6
I.2. Формування і будова зварного з'єднання	8
I.3. Силові параметри процесу ЗТП	9
I.4. Тепловиділення при ЗТП.	11
Розділ II. Математичне моделювання температурних полів при ЗТП	13
II.1 Постановка крайової задачі теплопровідності	13
Розділ III. Експериментальні дослідження ЗТП	24
Висновки	26
Список використаної літератури	27

## АНОТАЦІЯ

**Актуальність теми.** Зварювання тертям з перемішування як різновид зварювання тиском є найбільш молодих способів, який отримав промислове запровадження. Подальший розвиток зварювання тертям перемішування тісно пов'язаний з теоретичними дослідженнями самого процесу, а саме постановкою і розв'язанням задач тепломасообміну і термомеханіки в зоні зварювання, дослідження температурних полів як у зварюваному виробі, так і в робочому інструменті.

**Мета роботи.** На основі моделювання джерел теплоти при зварюванні тертям з перемішуванням дати аналітичну оцінку температурних полів у з'днуваних металах.

### **Завдання:**

1. Розробити математичну модель поширення тепла в металах і отримати аналітичні розв'язки теплових задач за різними розрахунковими схемами “робоче тіло–джерело тепла”.
2. Дослідження макроструктури зварюваних зразків.
3. Практичні експерименти зварювання тертям з перемішуванням.
4. Сформулювати висновки.

**Загальна характеристика роботи.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури.

Роботу викладено на 30 сторінок машинописного тексту, в тому числі містить 17 рисунків.

## ВСТУП

Зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП, англ. Friction Stir Welding,) – найбільш яскравий технологічний прорив в області зварювання і найбільш молодих способів. Запатентований в кінці 1991 р. Британським інститутом зварювання [1], цей спосіб отримав промислове запровадження в різних галузях промисловості. Було створено промислове обладнання, зокрема для зварювання тонкостінних елементів з алюмінієвих та інших кольорових сплавів.

Аналіз повідомлень про ЗТП на різних симпозиумах [2], оглядові статті в Росії [3], Україні [4], а також численні науково-технічні публікації за останні 20 років свідчать про інтенсивні дослідження процесу і все більш ширшому практичному використанню в різних галузях промисловості, головним чином для виготовлення зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів.

Загальний вигляд зварного шва за технологією ЗТП показано на рис. 1.



Рис.1.– Загальний вигляд зварного шва ЗТП

Строго локалізоване тепловиділення в приповерхневих шарах деталей при зварюванні тертям є головною особливістю цього процесу, яке визначає його енергетичні і технологічні переваги, до яких в першу чергу відносять високу продуктивність.

За порівняно короткий час промислового використання ЗТП зарекомендувало себе як високопродуктивний технологічний процес, який дозволяє виготовляти високоякісні з'єднання деталей з великого числа різних однорідних і різнорідних металів і сплавів, і має низку інших переваг. Це одна з основних

причин широкого використання зварювання тертям у різних галузях промисловості.

На даний час технологія зварювання тертям широко використовується для зварювання насамперед алюмінієвих сплавів, а також міді та її сплавів, інших сплавів кольорових металів.. Отримано позитивні результати при зварюванні сталей, сплавів на титановій та нікелевій основі. Загальні вигляди окремих зварних з'єднань, отриманих цим способом наведено на рис. 2 і рис. 3.



Рис.2 – Трубне з'єднання з алюмінію (а) і зварне з'єднання листів з алюмінієвого сплаву і міді (б)



Рис. 3– Зварний трубний виріб із сплаву АМг-3м

Процес ЗТП інтенсивно вивчається. На даний час у світі накопичено достатньо багато даних стосовно використання цього технологічного процесу, публікуються результати теоретичних і експериментальних досліджень. На сьогоднішній день все ж залишається ще багато “білих плям”, які вимагають подальших теоретичних і експериментальних досліджень.

## I. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ

### I.1. Суть способу ЗТП

В загальному ідея зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) є дивною простою і привабливою. З'єднання металевих заготовок здійснюється перемішуванням зварюваних кромки спеціальним обертовим інструментом, зануреним углиб металу і переміщуваним вздовж стика (рис. 4).

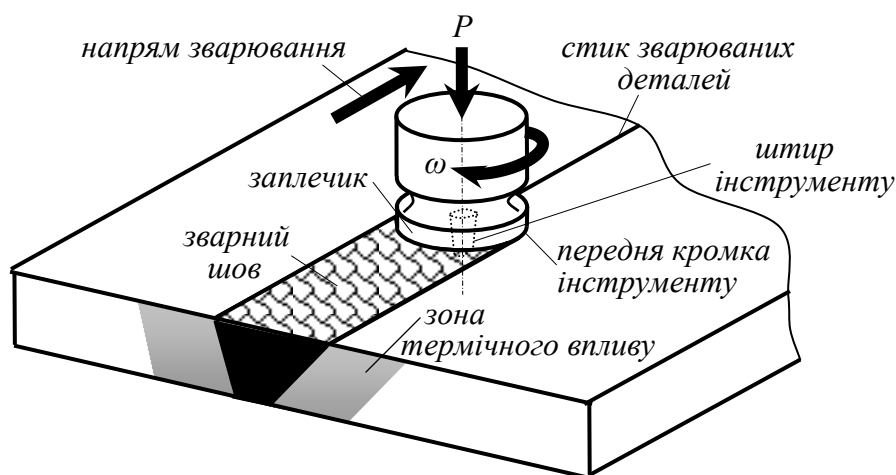


Рис. 4– Схема зварювання тертям з перемішуванням

До особливостей процесу ЗТП як процесу зварювання в твердому стані, відноситься не тільки тепловиділення на контактних поверхнях тертя, але й тепловиділення від механічного деформування (пластичного перемішування) металу шва.

Важливим елементом у цьому способі є зварювальний інструмент, який конструктивно складається з плоского або профільованого бурта (заплечика) і розташованого на ньому штиру різного профілю, який іноді називають *пін*ом. Робоча поверхня інструменту має спеціальний профіль (рис. 5).

Робочі інструменти виготовляються з інструментальних сталей, нержавіючих мартенситних сталей. Іноді використовують інструменти, в яких наконечник (пін) виготовляють з кобальтового сплаву, а заплечик з інструментальної сталі.



Рис. 5 – Конструкції робочого інструменту

Основними функціями наконечника (піна) є перемішування і перенесення матеріалу шляхом його *екструзії* (витискування) між поверхнею інструмента і нерозм'якшеним матеріалом. Тертя бурта і піна в контакті із зварюваним матеріалом викликає тепловиділення, за рахунок якого відбувається розм'якшення і пластична деформація тонких приконтактних шарів матеріалу, в яких реалізується внутрішнє тертя.

Пластифікований тепловиділенням метал за рахунок сил тертя закручується відносно осі обертання інструменту. В процесі переміщення інструменту по стику зварюваних поверхонь відбувається перемішування і перенесення металу з формуванням зварного шва (рис. 6).

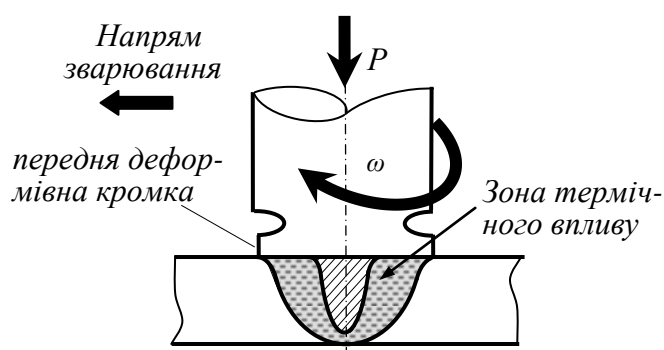


Рис. 6– Схема формування зварного шва

При ЗТП зварювальний інструмент зазнає інтенсивну теплову і силову дію, які лімітують його строк служби. Зміна форми робочої частини інструмента приводить до порушення стабільності зварювального процесу.

## 1.2. Формування і будова зварного з'єднання.

На основі сучасних гіпотез утворення нероз'ємного з'єднання у твердому стані і теоретичних узагальнень результатів експериментальних досліджень вважається що при ЗТП процес протікає у три стадії [5].

*Перша стадія* – зближення, очищення з'єднуваних поверхонь (фізичний контакт) здійснюється за рахунок спільної пластичної деформації і перемішування приграничних об'ємів металу з'єднуваних деталей

У *другій стадії* в результаті нагріву зварюваного металу до гомологічної температури  $(0,6 \dots 0,8) T_{пл}$  та інтенсивної пластичної деформації зі сторони інструменту спостерігається перехід металу в активований в'язкоплинний стан, який приводить до інтенсивного масопереносу.

*Третя стадія* – утворення зварного з'єднання у твердій фазі в результаті пластичного деформування, механічного перемішування макрооб'ємів металу з наступним протіканням динамічної рекристалізації, яка забезпечує утворення зварного з'єднання.

Експериментально встановлено, що для алюмінієвих сплавів з'єднання відбувається у твердій фазі при температурі на передній (лицьовій) з'єднання не більше  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при нормальному тиску  $6 \dots 8\text{ МПа}$ .

На основі дослідження мікроструктури великого масиву з'єднань різних алюмінієвих сплавів можна виділити декілька зон у зварному з'єднанні (рис. 7).

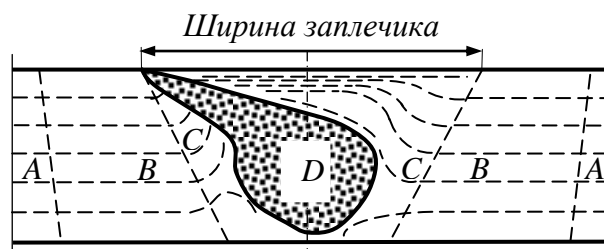


Рис. 7– Схема будови зварного з'єднання при зварюванні тертям перемішуванням



Зона *D* виділяє переміщуваний метал. Макроструктура цієї зони має цибулинну форму, зумовлену обертовою дією піна робочого інструменту. Структура складається з дрібних рівноосних зерен. Формування такої структури зумовлено процесом рекристалізації в умовах дії інтенсивних пластичних деформацій і високих температур.

В прилеглих до зони перемішування з обох сторін розташовані зони термомеханічного впливу *C*. Пластична деформація і температура у цих зонах менші, ніж в зоні перемішування. Наслідком цього є утворення структури, що має і дрібні, і порівняно крупні зерна, оскільки ця зона рекристалована тільки частково.

В зонах термічного впливу *B* зерна мають великі розміри, оскільки їх матеріал зазнавав дії тільки підвищених температури за відсутності пластичних деформацій. Матеріал у цій зоні має порівняно найбільш низькі міцнісні властивості.

В цілому якість зварних з'єднань при ЗТВ визначається комплексом технологічних параметрів (частота обертання робочого інструмента, швидкість зварювання, зусилля притискання інструмента, його характеристики (матеріал, розміри, геометрія профілів тощо). Усі ці параметри вагомо впливають на тепловиділення в ході процесу.

### **I.3. Силові параметри процесу ЗТП.**

До особливостей процесу ЗТП як процесу зварювання в твердому стані, відноситься не тільки тепловиділення на контактних поверхнях тертя, але й тепловиділення від механічного деформування (пластичного перемішування) металу шва.

На відміну від класичних способів зварювання тертям перемішуванням протікає в системі дії різних сил, зв'язаних з тиском робочого інструмента, що обертається, і його поступовому переміщенні при виконанні зварного шва [6, 7]. Основними силовими параметрами процесу є такі (рис. 8):

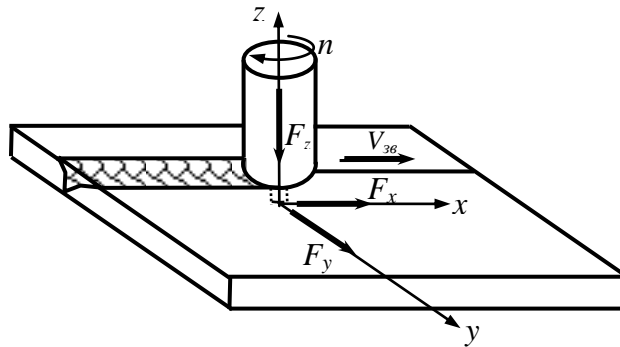


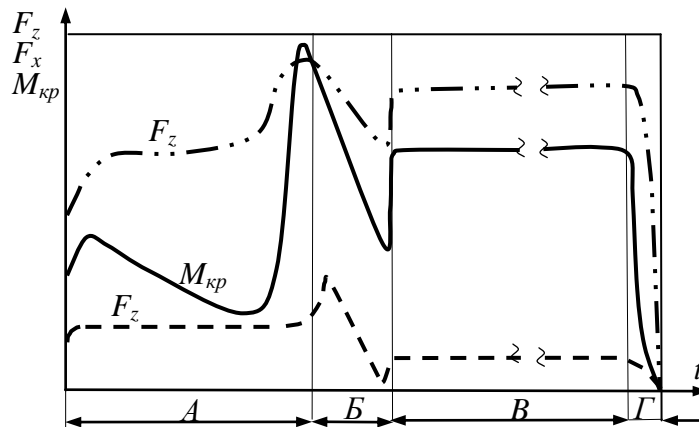
Рис. 8– Схема сил, що діють на інструмент в процесі зварювання

1. Сила, яка діє на інструмент в процесі зварювання. Її можна розкласти на складові в декартовій системі координат:

- $F_x$  – сила, що діє в напрямі зварювання (вздовж шва);
- $F_y$  – сила, що діє перпендикулярно до напрямку зварювання;
- $F_z$  – сила, що діє в напрямі, перпендикулярному площині зварювання.

Очевидно, що величини діючих сил залежать від матеріалів зварюваних заготовок, температур в зоні зварювання, швидкості зварювання, геометрії зварювального інструмента. При інших однакових умовах значення сил буде збільшуватися при зменшенні температури і збільшенням швидкості зварювання. Високі значення сил можуть привести до руйнування інструмента.

На рис. 9 наведено характерну циклограму зварювання, що відображає характер зміни силових параметрів (нормальної (осьової) сили  $F_z$ , крутного моменту  $M_{кр}$ , сили опору переміщенню в напрямі зварювання  $F_x$ ) на різних часових інтервалах.

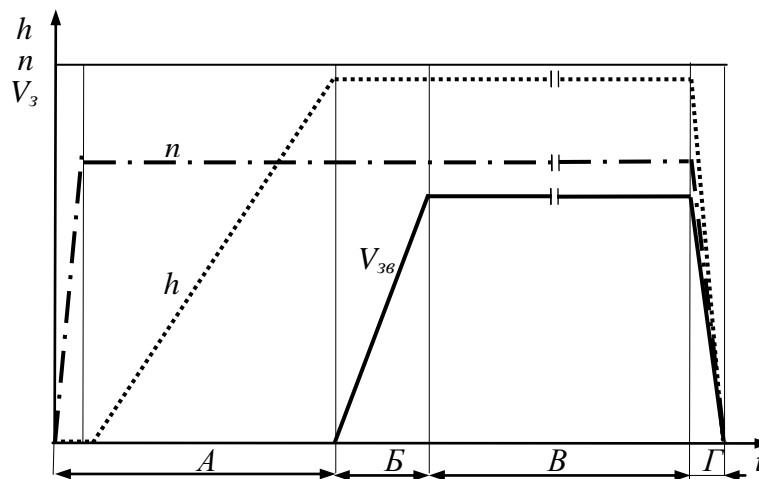


$A$  – врізання інструменту;  $B$  – пауза;  $B$  – переміщення вздовж шва;  $\Gamma$  – виведення інструмента

Рис. 9 – Циклограма силових параметрів процесу зварювання тертям з перемішуванням

2. Швидкість зварювання  $V_{зв}$  визначається швидкістю переміщення інструмента в напрямі зварювання. Малі швидкості зварювання можуть привести до перегріву матеріалу, зміни умов термомеханічної дії, збільшенню зони термічного впливу і, як наслідок, зниженню міцнісних характеристик зварного з'єднання.

Циклограму процесу зварювання тертям перемішуванням, яка включає швидкість обертання інструмента  $n$ , глибину його врізання  $h$  і швидкість зварювання  $v_{зв}$ , показано на рис. 10.



$A$  – врізання інструмента;  $B$  – пауза;  $B$  – переміщення вздовж шва;  $\Gamma$  – виведення інструмента

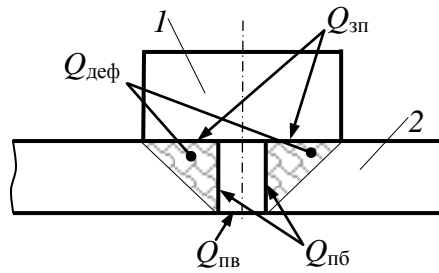
Рис. 10– Циклограма процесу зварювання тертям з перемішуванням

#### І.4. Тепловиділення при ЗТП.

В загальному теплові процеси при зварюванні відіграють головну роль в утворенні зварного з'єднання, а також впливають на міцнісні характеристики зварного шва. Щоб управляти тепловими процесами при зварюванні, необхідно знати де і як поширюється теплота у зварюваних деталях, а також як відбувається поверхневий теплообмін.

Загальна кількість теплоти  $Q_{\Sigma}$ , яка генерується на поверхнях тертя при ЗТП, складе (рис. 11) [8].

$$Q_{\Sigma} = Q_{пв} + Q_{пб} + Q_{зп} + Q_{де}, \quad (1)$$



1 – робочий інструмент; 2 – зварювані деталі  
Рис. 11– Схема джерел теплоти при зварюванні тертям перемішуванням

де  $Q_{пв}$ ,  $Q_{пб}$ ,  $Q_{зп}$  – теплота, виділювана відповідно у вершині і на бічній поверхні піни;

$Q_{зп}$  – теплота, виділювана на поверхні заплечика.

$Q_{деф}$  – теплота, виділювана при внутрішньому пластичному деформуванні металу.

Для таких умов тепловиділення розробляються математичні моделі температурних полів для різних стадій процесу ЗТП. В більшості математичне моделювання проводиться на основі розв'язання нелінійного рівняння теплопровідності чисельним способом, зокрема методом кінцевих елементів (МКЕ) [8]. При усій привабливості методу він не дає розв'язку у вигляді взаємопов'язаних параметрів процесу, їх впливу тощо.

В нечисленних аналітичних розв'язках [9], отриманих на базі лінійного диференціального рівняння теплопровідності, розглядаються спрощені розрахункові схеми з традиційно схематизованими джерелами теплоти (лінійне, плоске), нехтуючи іноді теплообміном з навколишнім середовищем.

## II. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ПРИ ЗТП

Нижче пропонується аналітичний метод дослідження процесів поширення тепла при ЗТП. При цьому доцільно використовувати використовуваний в теорії теплопровідності при зварюванні метод за етапами [10, 11]:

- миттєве джерело – робоче тіло;
- постійнодіючі нерухомі джерела теплоти;
- рухомі джерела теплоти

Нижче розглядаються розрахункові схеми з різними джерелами тепла миттєвої дії.

### II.1. Постановка крайової задачі теплопровідності.

Як відмічалось вище, для ЗТП основними джерелами тепловиділення є контактні поверхні робочого інструмента. Тому в роботі пропонується спрощена розрахункова схема “пластина – джерело тепла”, в якій джерелом тепла є робочий інструмент у вигляді циліндра з плоским торцем, яким він треться по поверхні зварюваних деталей (рис. 12).

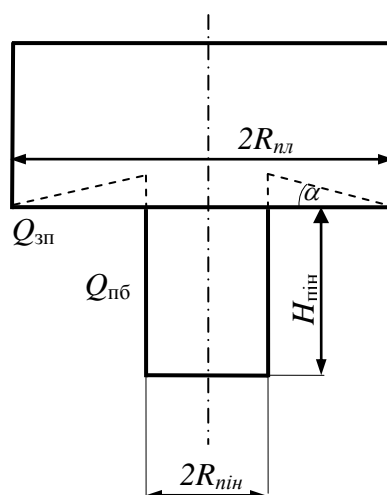


Рис. 12– Схема тепловиділення у робочому інструменті

Основним джерелом стоку тепла є відведення в деталі. Іншими джерелами стоку тепла є підкладка і притискачі складально-зварювального оснащення, а також конвективний теплообмін з навколишнім середовищем.

Для розрахунку температур за вибраною схемою використано диференціальне рівняння теплопровідності у вигляді

$$\frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} - \frac{W}{2\pi\lambda}. \quad (2)$$

Тут  $T$  – температура, °С;

$a$  – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, м<sup>2</sup>/с;

$\lambda$  – коефіцієнт тепловідності матеріалу, Вт/(м·°С);

$r$ ,  $z$  і  $t$  – відповідно просторові і часова змінні;

$W$  – об'ємна потужність джерела тепла, Дж/(с·м<sup>3</sup>).

Крайові умови:

$$T(r, z, 0) = 0; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} - \alpha_1 T(r, 0, t) = 0; \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T(r, \delta, t)}{\partial z} + \alpha_2 T(r, \delta, t) = 0. \quad (5)$$

Тут  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти теплообміну на поверхнях відповідно  $z = 0$  і  $z = \delta$ .

Функцію  $W$  виразимо через добуток асиметричних імпульсних функцій зі зсувом по  $r$  на величину  $r_0$  координати положення джерела тепла у вигляді

$$W = \frac{Q}{r} \cdot \frac{\delta_+(r - r_0)}{r} \cdot \delta_+(z) \cdot \delta_+(t). \quad (6)$$

Для розв'язання задачі (2)–(6) використано продуктивний метод інтегральних перетворень по просторових і часовій змінних [11, 12].

Для зручності розв'язання вихідна задача розбивається на два етапи, де окремо розглядається дія джерел  $Q_{\text{пб}}$ , і  $Q_{\text{зп}}$  і даються деякі пояснення.

В розрахункових схемах зварюваним матеріалом вибрано пластину товщиною  $\delta = 0,6$  см з алюмінієвого сплаву з теплофізичними характеристиками:

$$c\rho = 2,72 \cdot \text{МДж}/(\text{м}^3\text{°C}); \quad \lambda = 164 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C}); \quad a = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Коефіцієнти теплообміну на верхній і нижній поверхнях пластини відповідно  $\alpha_1 = 18 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$  і  $\alpha_2 = 160 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ; коефіцієнт температуропровідності  $b = 0,011 \text{ 1/с}$ .

**П.1.1. Миттєве кільцеве лінійне джерело  $Q_{\text{пб}}$  – пластина.** Розглянемо розрахункову схему, в якій кільцеве джерело теплоти рівномірно розподіляється по пластині товщиною  $\delta$  (рис. 13).

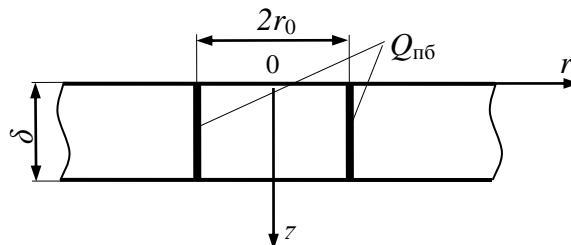


Рис. 13 – Розрахункова схема “пластина – миттєве лінійне кільцеве джерело теплоти”

Вихідне диференціальне рівняння теплопровідності запишемо після підстановки виразу (6) в рівняння (2), а саме

$$\frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = -\frac{Q_2}{2\pi\lambda} \cdot \frac{\delta_+(r-r_0)}{r} \cdot \delta_+(z) \cdot \delta_+(t). \quad (7)$$

Відмітимо, що у правій частині (7) позначено дію миттєвого кільцевого джерела  $Q_2$  радіусом  $r_0$ , зосередженого на поверхні (рис. 14).

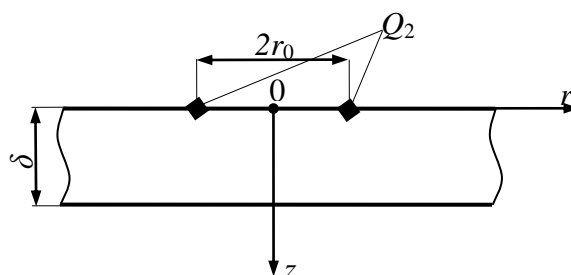


Рис. 14. – Розрахункова схема “пластина – миттєве кільцеве джерело теплоти”

Для того, щоб перейти до лінійного (по осі  $z$ ) кільцевого джерела (рис. 13) потрібно, розглядаючи його як одночасну дію сукупності миттєвих кільцевих джерел, рівномірно розподілених по товщині пластини, проінтегрувати рівняння (7) (по  $z$ ) в межах від 0 до  $\delta$ . В результаті цього отримаємо рівняння, в якому функція температури вже не залежатиме від змінної  $z$ , а розрахункова схема буде відповідати рис. 13.

Отже,

$$\int_0^{\delta} \left[ \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] dz + \int_0^{\delta} \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} dz - \int_0^{\delta} \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} dz =$$

$$= -\frac{Q_2}{2\pi\lambda} \cdot \frac{\delta_+(r-r_0)}{r} \cdot \delta_+(t) \cdot \int_0^{\delta} \delta_+(z) dz$$

і, враховуючи що

$$\int_0^{\delta} \delta_+(z) dz = 1,$$

$$\left( \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right) \cdot \delta + \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0}^{z=\delta} - \frac{\delta}{a} \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} =$$

$$= -\frac{Q_{\text{нб}}}{2\pi\lambda} \cdot \frac{\delta_+(r-r_0)}{r} \cdot \delta_+(t). \quad (8)$$

Підставивши у вираз (12) граничні умови (10) і (11), будемо мати

$$\frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} - \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{\lambda\delta} \cdot T(r, t) - \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} =$$

$$= -\frac{Q_{\text{нб}}}{2\pi\lambda\delta} \cdot \frac{\delta_+(r-r_0)}{r} \cdot \delta_+(t). \quad (9)$$

Опускаючи операції послідовного застосування до рівняння (9) прямих і обернених інтегральних перетворень Лапласа (по  $t$ ) і Ханкеля (по  $r$ ), приведемо остаточний розв'язок

$$T(r, t) = \frac{Q_{\text{нб}}}{4\pi\lambda\delta \cdot t} \exp \left[ -\frac{r^2 + r_0^2}{4at} - bt \right] I_0 \left( \frac{rr_0}{2at} \right). \quad (10)$$



де  $I_0\left(\frac{rr_0}{2at}\right)$  – модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку.

Тут, враховано  $a = \lambda/c\rho$ ,  $b = (\alpha_1 + \alpha_2)/c\rho\delta$  – коефіцієнт температуровіддачі, 1/с.

Характерний розподіл температур для розрахункової схеми “миттєве кільцеве джерело – пластина” наведено на рис. 15.

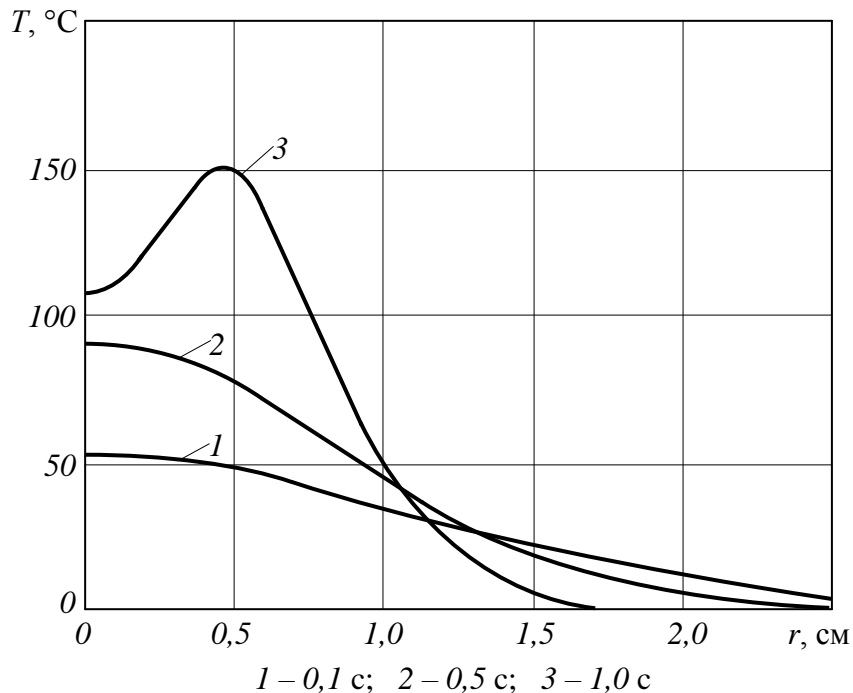


Рис. 15 – Розподіл температур по радіусу  $r$  від дії миттєвого кільцевого джерела ( $Q = 800$  Дж;  $r_0 = 0,6$  см) в пластині ( $\delta = 0,6$  см) в різні моменти часу

В початковий момент часу максимальні температури досягаються в околі контуру прикладання  $r = r_0$ . З віддаленням від джерела температура різко спадає. Проте це спадання менше до центру координат, оскільки тепло від усіх точок джерела, поширюючись в область, обмежену кільцевим джерелом, зосереджується всередині кільця. Тому температура всередині кільця радіусом  $r = r_0$  знижується повільніше, ніж в точках поза цим радіусом. Зі збільшенням часу  $t$  максимальне значення температури знижується і переміщується у початок координат

Натомість тепло, яке поширюється у зовнішню відносно джерела область, швидко “розсмоктується” завдяки двом факторам – збільшенню поверхні, через яку воно поширюється, і наявності тепловідведення в навколишнє середовище.

Поклавши в (10)  $r_0 = 0$ , отримаємо відому формулу поширення тепла від дії миттєвого зосередженого лінійного джерела [11]:

$$T(r,t) = \frac{Q_2}{4\pi\lambda\delta \cdot t} \exp\left(-\frac{r^2}{4at} - bt\right). \quad (11)$$

Таким чином, формула (10) придатна для розрахунку температур у пластині від тепловиділення на бічній поверхні піна (штиря) робочого елемента.

**П.1.2. Миттєве кільцеве розподілене джерело  $Q_{зп}$  на поверхні пластини (рис. 16).**

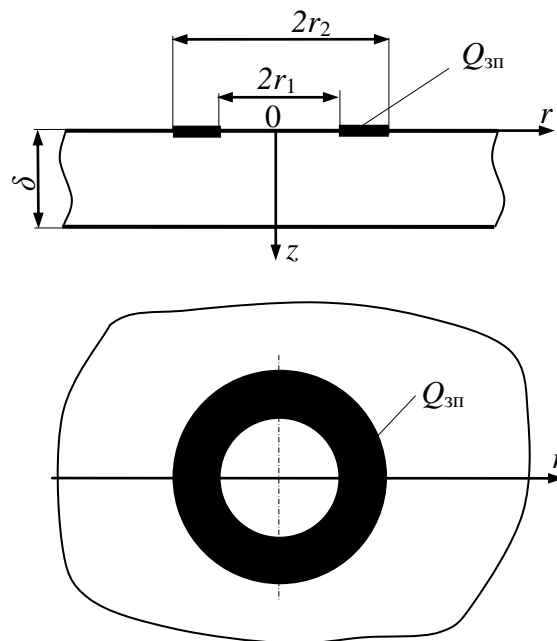


Рис. 16. – Розрахункова схема “пластина – миттєве поверхнєве кільцеве джерело теплоти”

Попередньо розв’яжемо задачу з кільцевим джерелом на поверхні пластини (рис. 14). Як і раніше, для  $W$  приймемо вираз (6)

$$W = \frac{Q_2}{r} \cdot \frac{\delta_+(r-r_1)}{r} \cdot \delta_+(z) \cdot \delta_+(t). \quad (12)$$

Проведемо послідовно інтегральні перетворення Лапласа і Ханкеля у рівнянні теплопровідності (7) з урахуванням (12). В двократних зображеннях будемо мати

$$\left(\alpha^2 + \frac{s}{a}\right) \cdot \bar{\bar{T}}(\alpha, z, s) + \frac{\partial^2 \bar{\bar{T}}(\alpha, z, s)}{\partial z^2} = \frac{Q_2}{2\pi\lambda} \cdot J_0(\alpha r_1) \cdot \delta_+(z). \quad (13)$$

На наступному етапі застосовують до виразу (13) кінцеве перетворення Фур'є (за змінною  $z$ ) [12].

Запишемо розв'язок задачі в зображеннях:

$$\bar{\bar{T}}_n(\alpha, \mu_n, s) = \frac{Q_2}{2\pi\lambda} \cdot J_0(\alpha r_1) \cdot \frac{\mu_n}{\left(\alpha^2 + \frac{s}{a} + \mu_n^2\right)}. \quad (14)$$

Після виконання обернених перетворень отримаємо остаточний розв'язок задачі в оригіналах у вигляді

$$T(r, z, t) = L^{-1}[\bar{\bar{T}}_n(r, \mu_n, t)] = \frac{Q_2}{2\pi\lambda\delta t} \cdot I_0\left(\frac{rr_1}{2at}\right) \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left[\mu_n \cos\left(\frac{\mu_n}{\lambda}\delta\right) + Bi_1 \sin\left(\frac{\mu_n}{\lambda}\delta\right)\right] \cdot \mu_n}{D_n} \exp\left[-\frac{r^2 + r_1^2}{4at} - \mu_n^2 \frac{at}{\delta^2}\right]. \quad (15)$$

Тут уведено позначення

$$D_n = \frac{1}{(\mu_n^2 + Bi_2^2)} \cdot \left\{ (\mu_n^2 + Bi_1^2) \cdot [Bi_2 + (\mu_n^2 + Bi_2^2)] + Bi_1 (\mu_n^2 + Bi_2^2) \right\}. \quad (16)$$

Корені  $\mu_n$  визначаються з трансцендентного характеристичного рівняння

$$\text{ctg}(\mu_n) = \frac{\mu_n^2 - Bi_1 \cdot Bi_2}{(Bi_1 + Bi_2) \cdot \mu_n}. \quad (17)$$

де

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1}{\lambda} \delta; \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2}{\lambda} \delta. \quad (18)$$

Рівняння (15) є остаточним розв'язком задачі і описує процес поширення тепла в об'ємі тіла від миттєвої дії поверхневого кільцевого джерела тепла на поверхні пластини.

Для переходу до випадку розподіленого на деякій круговій поверхні пластини, обмеженій двома колами радіусами  $r_1$  і  $r_2$  (рис. 16). Для такої схеми розрахункову формулу можна отримати шляхом інтегрування формули (15) в межах від  $r_1$  до  $r_2$ , припускаючи, що тепло прикладено миттєво до усієї поверхні кільця і складає нескінченно малу величину  $dQ_2$ , яку представимо у вигляді  $dQ_2 = 2\pi q_l r_0 dr_0$  і підставимо її у вираз (15).

Остаточо отримаємо

$$T(r, z, t) = \frac{2\pi q_l}{2\pi\lambda\delta t} \int_{r_1}^{r_2} \exp\left(-\frac{r^2 + r_1^2}{4at}\right) \cdot I_0\left(\frac{rr_1}{2at}\right) r_1 dr_1 \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left[ \mu_n \cos\left(\frac{\mu_n}{\lambda} \delta\right) + Bi_1 \sin\left(\frac{\mu_n}{\lambda} \delta\right) \right] \cdot \mu_n}{D_n} \exp\left[-\mu_n^2 \frac{at}{\delta^2}\right]. \quad (19)$$

де  $q_l$  – розподілене по поверхні кільця джерело тепла, Дж/м<sup>2</sup>.

Рівняння (19) є розв'язком задачі і описує процес поширення тепла в об'ємі тіла від миттєвої дії кільцевого розподіленого джерела тепла на поверхні пластини.

При виборі питомої теплоти  $q_l$  бралось до уваги, що тепловиділення на круговій ділянці складає до 90 % від загального тепловиділення на контактних поверхнях тертя.

На рис. 17 наведено розподіл температур по радіусу  $r$  від дії миттєвого кругового джерела на верхній і нижній поверхнях пластини. З кривих видно, що деяка відмінність температур в околі центра координат в дуже короткий час

( $t = 0,1$  с), усувається з часом і розподіл температур вирівнюється на обидвох поверхнях.

З графіків видно, нерівномірний розподіл температур на верхній і нижній поверхнях пластини проявляється тільки в незначний початковий час, а вже практично через 0,5 с пластина по товщині прогрівається рівномірно.

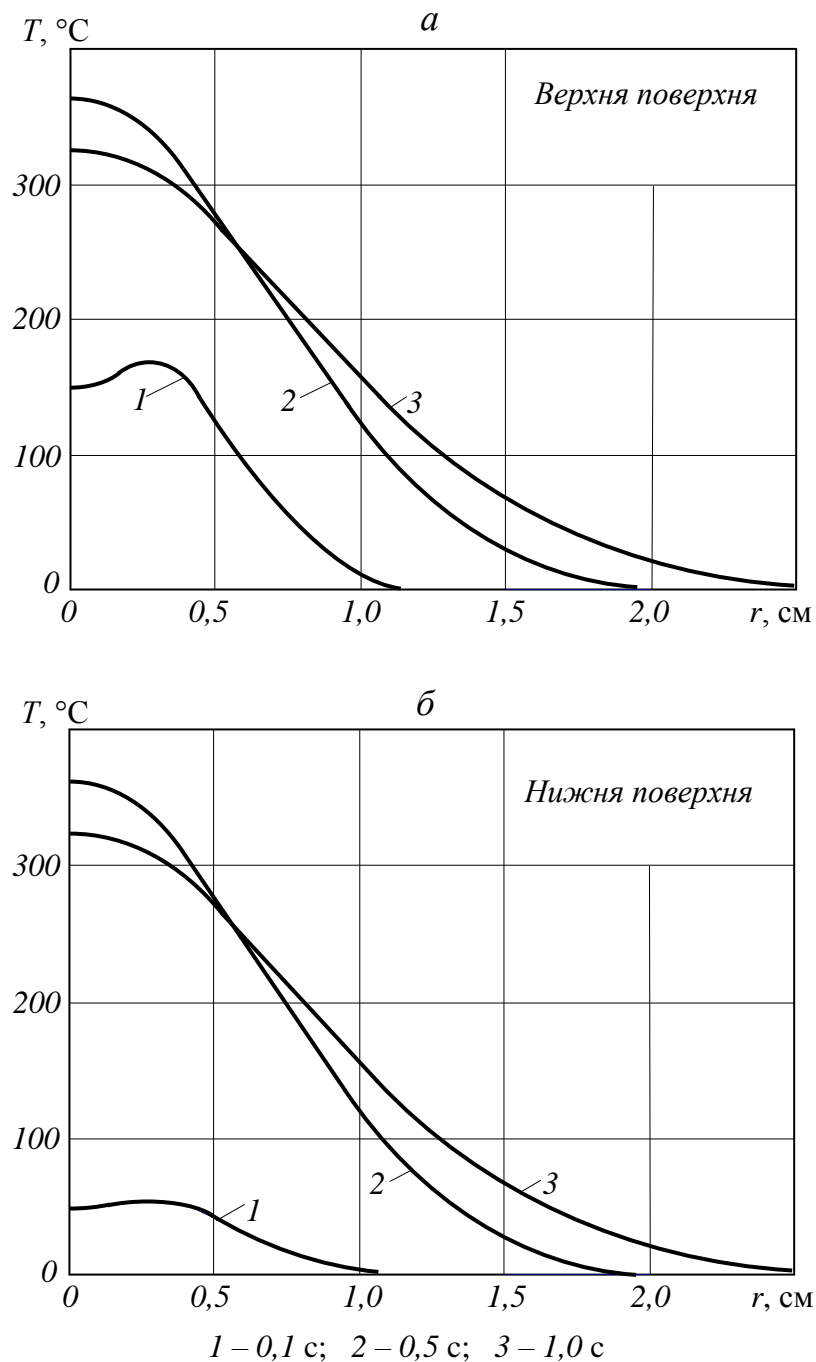


Рис. 17– Розподіл температур по радіусу  $r$  від дії миттєвого кругового джерела ( $q_1 = 1160$  Дж/см<sup>2</sup>) на поверхнях пластини ( $\delta = 0,6$  см) в різні моменти часу

На рис. 18 побудовано термічний цикл точки  $r = 1,3$  см на поверхні пластини від дії миттєвого кругового джерела. З наведеного графіка можна зробити такі окремі висновки.

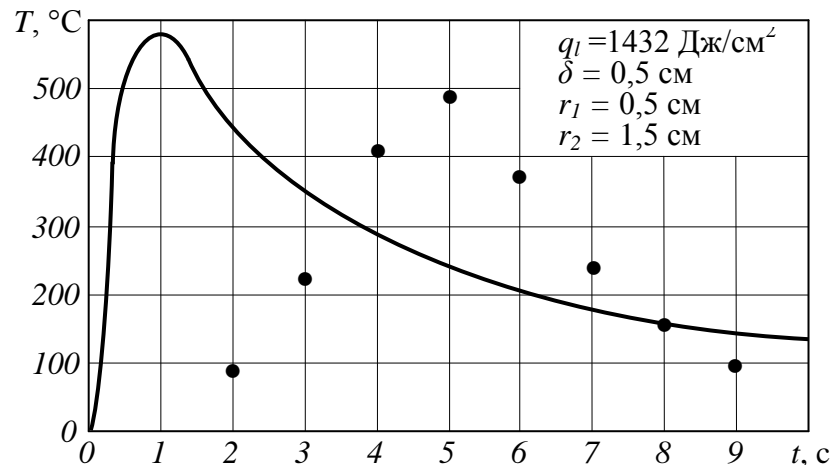


Рисунок 18– Термічний цикл точки  $r = 1,3$  см на поверхні алюмінієвої пластини

1. Максимальна температура на поверхні пластини не досягає температури плавлення матеріалу.
2. Відмічено різкий спад температури за перші 2...3 с після досягнення максимуму. Високі температурні градієнти і мала тривалість перебування металу шва при високих температурах сприятливо позначається на його структурі.
3. Протягом декількох секунд матеріал пластини перебуває в області температур, при яких в металі можуть розвиватися рекристалізаційні процеси.

На рис. 18 точками позначено результати експериментальних вимірювань температури в заданій точці. Видно, що експериментальний термічний цикл зберігає очікувану залежність температури від часу, хоча гілка нагрівання зміщується в сторону більшого часового діапазону. Таку відмінність можна пояснити кількома причинами.

1. В аналітичних розв'язках теплофізичні характеристики приймалися як постійні величини, незалежні від температури. Крім цього, не бралось до уваги,

що тепловий ефект при терті залежить від коефіцієнта тертя, температури і часу, інших факторів.

2. При теплових розрахунках необхідно враховувати що тепловиділення на поверхні тертя розподіляється між пластиною і робочим інструментом. Кількість тепла, яке відбирається робочим інструментом, можна прийняти прямопорційним відношенню ефективних об'ємів матеріалу робочого інструмента і пластини. Ефективні об'єми пластини і робочого інструмента і кількості тепла, яке поступає в робочий інструмент і пластини, можна виразити формулами [10]:

$$K = \frac{V_{ef.pl}}{V_{ef.instr}}; \quad V_{ef.pl} = \pi r_{ef.pl}^2 \cdot \delta \quad V_{ef.instr} = \pi r_{ef.instr}^2 \cdot H_{instr}; \quad (20)$$

$$Q_{instr} = \frac{Q}{K}; \quad Q_{pl} = Q - Q_{instr} \cdot (21)$$

Тут  $Q_{instr}$  – кількість тепла, що поступає в робочий інструмент;

$Q_{pl}$  – тепло, яке поступає в пластину;

$V$ ,  $r$ ,  $H$  – ефективні значення (з відповідними значками символів) відповідно об'ємів, радіуса і довжини робочого інструмента і пластини.

3. В розрахункових схемах можна було б враховувати обмежені розміри зварюваних елементів, уточнювати коефіцієнти теплообміну на граничних поверхнях тощо.

Аналітичний розв'язок адекватно описує процес теплопровідності при ЗТВ, зокрема, підтверджується, що метал шва формується при температурах нижче температури плавлення зварюваного металу.

### III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗТП

На базі університетських виробничих можливостей проведено практичні експерименти з виконання зварних швів на установці з використанням смердлильного верстата (рис. 19)



Рис. 19.– Установка для зварювання на базі свердлильного верстата

При виконанні зварних швів використовувався робочий елемент із загартованої низьколегованої сталі 15ХМ.

Для зварювання використовувалися пластини з алюмінієвих сплавів АМг-2 і АД-1 товщиною 6,0...10,0 мм.

Загальний вигляд фрагмента зварного шва пластин показано на рис. 20.

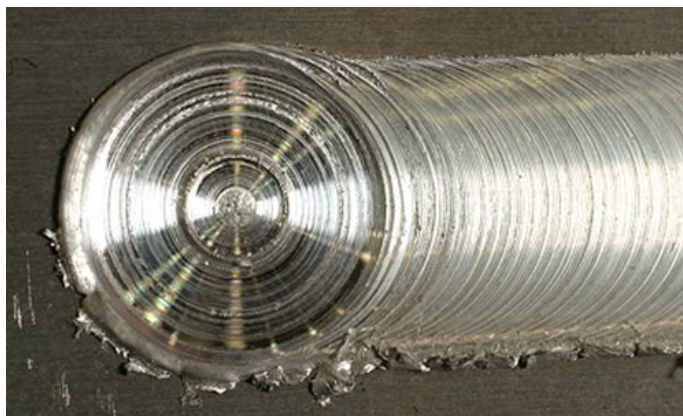


Рис.20– Фрагмент зварного шва ЗТП на алюмінієвій пластині



Макроструктуру з'єднання ЗТП алюмінієвого сплаву і будову зони перемішування у шві показано на рис. 21.

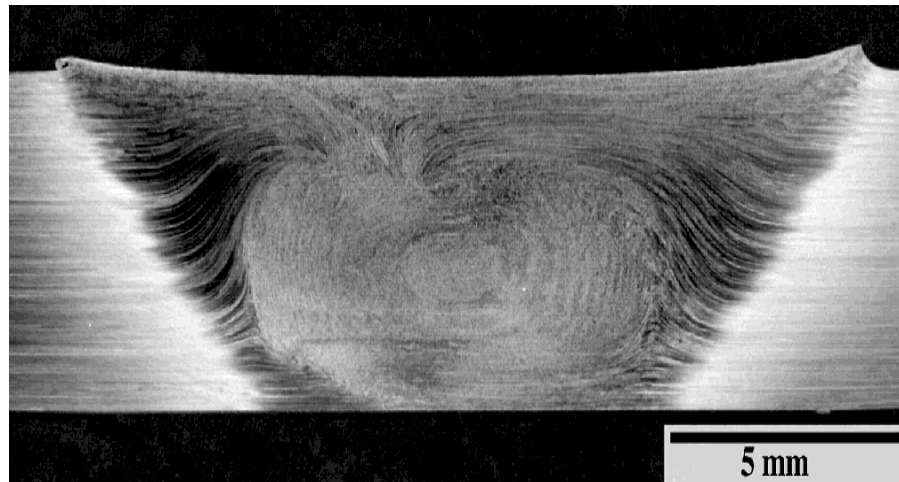


Рис. 21– Макроструктура зварного шва ЗТП алюмінієвого сплаву

На рис. 22 показано вигляд поверхні точкового приварювання алюмінієвого гвинта-саморіза до пластини. Мікроструктурні дослідження показали відсутність зони сплавлення. В точковому з'єднанні проявляються особливості будови зони перемішування; зона сплавлення практично відсутня.



Рис.22– Поверхня точкового приварювання саморіза (Al)

В цілому практичні експерименти підтвердили особливості формування і будову зварних з'єднань, виконаних за технологією ЗТП, описані в численній літературі.

## ВИСНОВКИ

1. Теплові процеси при ЗТП відіграють провідну роль в утворенні зварного з'єднання, а також впливають на його міцнісні характеристики.

2. Проведений аналітичний аналіз процесів теплопровідності в металах від тепловиділення на контактних поверхнях тертя дає *якісну* оцінку, пов'язану з особливостями зварювального процесу, зокрема, труднощами визначення тепловиділення на контактних поверхнях “робочий інструмент–тіло”.

3. Подальший розвиток зварювання тертям перемішування тісно пов'язаний з теоретичними дослідженнями самого процесу, а саме постановкою і розв'язанням задач тепломасообміну і термомеханіки в зоні зварювання, дослідження температурних полів як у зварюваному виробі, так і в робочому інструменті.

4. Особливості процесу дозволяють прогнозувати наступні шляхи подальшого розвитку зварювання тертям:

- виконання досліджень в області оптимізації процесу;
- розроблення нових різновидів процесу зварювання тертям з метою розширення можливостей його промислового використання;
- виконання технологічних досліджень в області розширення номенклатури зварюваних тертям нових матеріалів і встановлення оптимальних режимів їх зварювання.
- розроблення нових зразків і систем універсального обладнання для зварювання деталей з великою номенклатурою оброблюваних деталей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Thomas, M., Nicholas, J., Needham, J., Murch, M., Templesmith, P., and Dawes, C. Friction Stir Welding, GB Patent Application No. 9125978.8 Dec. 1991, US Patent No. 5460317, 1991.
2. Colegrove P.A., Shercliff H.R. Modelling the Friction Stir Welding of Aerospace Alloys / 5th Intern. Friction Stir Welding Symp. 14—16 Sept. – Metz, France, 2004. — p. 21.
3. Штрикман М. М. Новый способ сварки трением и перспективы его применения (обзор) // Сварочное производство. 2001. № 11. С. 36—41.
4. Третьяк Н. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (обзор) // Автоматическая сварка. 2002. № 7. С. 12—21.
5. Dawes C. J. An introduction to frictional stir welding butt and its developments/Welding and Fabrication/– Jan.–1995
6. Krishnan K. N. On the Formation of Onion Rings in Friction Stir Welds/ Materials Science and Engineering, A 327, no. 2 (April 30, 2002). –p. 246-251
7. Johnson R. Forces in friction stir welding of aluminium alloys // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan, 2001.
8. Schmidt H., Hattel J., Wert J. An analytical model for the heat generation in friction stir welding – Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 2004, **12**.– pp. 143–157.
9. Chen, C. M., and Kovacevic, R. 2003. "Finite element modeling of friction stir welding—thermal and thermomechanical analysis." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(13), 1319-1326.
10. Котлышев Р.Р. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов / Вестник ДГТУ. - 2010. - Т.10. №5(48) - С. 693-699.
11. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций.– Изд-во “ИНДПРОМ”, 1998.– 640 с.
12. Василик А. В., Дрогомирецький М. М., Кріль Я. А.– Теплові розрахунки при зварюванні.– Івано-Франківськ.: Факел, 2004.– 209 с.