

Винахід відноситься до області контролю якості виробів, а саме, якості з'єднань при лазерній зварці робочих контактів ("гарячих" спаїв) термопар із тугоплавких матеріалів.

Найбільш близьким по технічній суті до заявленого способу є спосіб контролю якості з'єднань "гарячого" спаю, при якому контролюють опір готової (звареної) термопари, а наявність дефектів визначають по різкому збільшенні (викиду) опору під час термоудару, або по розриву кола термопари при її руйнуванні в момент термоудару.

Недоліком вказаного способу є низькі техніко-економічні і метрологічні показники. Це впливає з того, що контрольна операція є додатковою, рознесеною в часі, стосовно технологічного процесу зварки термопари, вимагає обладнання для імітації термоудару. Крім того, динаміка зміни (осциляція) електроопору для термопар із тугоплавких матеріалів не може бути строго ідентифікована з дійсною дефектністю з'єднання.

У цьому способі контролю допускається тільки один рівень бракування за ознакою "так-ні", який не дозволяє провести за результатами контролю строгий аналіз технології зварки робочого контакту ("гарячого" спаю) термопари.

Задача винаходу - покращення комплексу показників контролю якості, а саме дешевизни, масовості (100% неруйнівних випробувань), однозначності результату, багаторівневості, корекція параметрів технологічного режиму зварки за результатами контрольних операцій.

Суть винаходу полягає в тому, що робочі кінці термоелектродів, зібрані в скрутку з зазором, зварюють лазерним випромінюванням з одночасним вимірюванням величини ефективної термо-ЕРС, що генерується з зони розплаву за цикл імпульсивної дії випромінювання на матеріал термоелектродів, і порівнюють цю величину з базовими величинами ефективних термо-ЕРС допускового, приймального, або бракувального рівнів і розрахунковою величиною функціонального зв'язку ефективної термо-ЕРС і технологічних параметрів режиму лазерної мікрозварки.

На фіг.1 дається функціональна схема пристрою для реалізації заявленого способу; на фіг.2 приведений графік залежності критерію працездатності виробу від ефективної термо-ЕРС із зонами багаторівневого контролю.

Приклад конкретного виконання.

Зібрані в скрутку з зазором термоелектроди А і Б укладають під джерелом лазерного випромінювання Дж. Система контролю складається з вимірчого посилювача 1, інтегруючого пристрою 2, блоку порівняння 3, блоку базових величин ефективних та розрахункових термо-ЕРС 4, блоку індикації 5, та пристрою запуску блоку порівняння 6.

При опроміненні скрутки з зазором робочих кінців термоелектродів, внаслідок термоелектричних ефектів в зоні нагріву генерується миттєва термо-ЕРС, яка подається на вхід вимірчого посилювача, інтегрується за весь цикл тривання лазерного імпульсу  $\tau$  інтегруючим пристроєм в ефективну величину

$$E_{\text{эф}}(\text{mV}) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} e \, dt},$$

згідно формули

одержане ефективне значення  $E_{\text{эф}}$  подається на

один вхід блоку порівняння, на другий вхід якого подається набір базових і розрахункових значень ефективних термо-ЕРС, результати порівняння виводяться на блок індикації. Пристрій запуску блоку порівняння 6 підключає блок базових величин ефективних та розрахункових термо-ЕРС до блоку порівняння 3 в момент подачі імпульсу випромінювання в зону зварювання.

Оскільки значення ефективної термо-ЕРС однозначно визначає величину критерію працездатності виробу, функціональна залежність між ними може бути вираженою поліномом виду:

$$K_R = K_{R0} + b_1 E_{\text{эф}} + b_2 E_{\text{эф}}^2 + \dots + b_n E_{\text{эф}}^n, \quad (1)$$

графічна інтерпретація якого показана на фіг.2. Наявність трьох зон значень працездатності дозволяє оцінити якість за тривірневим контролем; допуск, приймання, брак.

Наявність функціонального зв'язку термо-ЕРС - параметри режиму лазерного зварювання дає можливість оцінити відтворюваність і точність підтримання технологічного режиму процесу зварювання.

Як критерій працездатності виробу прийнято відношення ефективного значення електричного опору звареного взірця  $R_{\text{эф.зв.}}$ , одержаного за цикл випробування зварного гарячого спаю термопари на зкручування до повного руйнування, до ефективного значення електричного опору  $R_{\text{эф.о.}}$ , середнього для окремих термоелектродів, при такому ж випробуванні, тобто

$$K_R = \frac{R_{\text{эф.зв.}}}{R_{\text{эф.о.}}} \quad (2)$$

Область зміни  $K_R = 0-1$ .

Таким чином, можна довести, що ефективні значення електричних опорів достатньо повно характеризують як електричні, так і механічні властивості зони зварювання. Відомо, що об'єм розплавленого в процесі зварювання матеріалу визначає рівень гальванічного зв'язку (чим більший переріз розплавленої зони, тим менший її

перехідний електричний опір  $R_p = \frac{\rho_p}{S_p}$ , де  $\rho$  - питомий електричний опір матеріалу,  $l_p$  та  $S_p$  - відповідно довжина та площа поперечного перерізу розплавленої зони). З другого боку, застосовані випробування на зкручування характеризуються тотожністю напруженого стану по всій довжині звареної термопари і незмінністю напруженого стану і при цьому дотичні напруження в поперечному перерізі можуть бути представлені так

$$\tau_k = \frac{4}{\pi d} (3M_{\text{кр.}} + \theta \frac{dM_{\text{кр.}}}{d\theta}), \quad (3)$$

де  $d = \frac{\sqrt{4S_p}}{\pi}$  - умовний діаметр розплавленої зони;

$M_{\text{кр.}}$  - крутний момент;

$\theta$  - питомий кут закручування.

Виходячи із навантаження при випробуваннях, можна відзначити, що вони чутливі не тільки до дефектності розплавленої зони (мікропорожнини, малий переріз і т.п.), але і до дефектності (розшарування) в самих термоелектродах або в зонах термічного впливу, які прилягають до розплавленої зони.

Відомо, що із збільшенням площі поперечного перерізу розплавленої зони дотичні напруження в площині кручення будуть меншими і з'єднання

може витримати більші крутні цикли.

Однак, слід врахувати практично необхідну і достатню величину  $S_p$ , а отже, і рівень  $K_R$ . Особливістю лазерного зварювання проводів без присадкового матеріалу є те, що  $S_p < S_{np}$ , де  $S_{np}$  - площа поперечного перерізу проводів. Це пов'язано як з локальним розплавленням термоелектродів, так і з виносом розплавленого матеріалу в газову фазу (випаровування) та виплесками. Робочі перерізи зварних виробів достатні, якщо вони складають 40 - 60% від площі поперечного перерізу основного металу.

Практичні дослідження функціоналу  $K_R = f(E_{ef})$  для термопар із вольфрам-ренієвих термоелектродів ВР 5 і ВР 20 показали, що залежність (1) може бути подана у вигляді

$$K_R + 0,37 = -1,251 + 3,673 E_{ef} - 0,26 E_{ef}^2 \quad (4)$$

із коефіцієнтом множинної кореляції із  $\rho_{KR E_{ef}} = 0,84$ .

Графіка (фіг.2) впливає, що функціональні залежності на ділянках зростання і спаду  $K_R$  можуть бути лінійно-кусково апроксимовані ( $\rho_{KR E_{ef}} \geq 0,96$ ).

Таким чином, можна виділити бракувальний (частина висхідної і нисхідної гілок), допусковий (верхні частини висхідної і нисхідної гілок) та приймальний (горизонтальна площадка,  $\rho_{KR E_{ef}} \approx 0$ ) рівні якості зварного з'єднання.

Якщо  $K_R$  має яскраво виражений мінімальний характер, то  $E_{ef}$  є лінійно зростаючою величиною. Її поведінка прямо характеризує процеси, що відбуваються в зоні зварювання, із зростанням густини енергії випромінювання в точці нагріву зростає концентрація тепла в зазорі скрутки, інтенсифікуються процеси плавлення і наростає маса розплаву в зазорі скрутки. Це відповідає росту  $K_R$ . При збільшенні енергії випромінювання зростає і частка матеріалу, що виноситься із розплаву в газову фазу -  $K_R = f(E_{ef})$ , подальший ріст енергії випромінювання порушує рівновагу і маса розплаву різко зменшується через винос у вигляді виплесків та насичення газової фази. Результуюче значення поперечного перерізу розплавленої зони зменшується і, відповідно, зменшується величина  $K_R$ .

Оскільки, як показано вище,  $E_{ef}$  однозначно залежить від густини енергії випромінювання, то термо-ЕРС стає функціонально зв'язаною з двома основними технологічними параметрами процесу зварювання - напругою зарядки накопичувача  $x_1$  (що еквівалентна енергії випромінювання) і фокусною віддаллю  $x_2$  (що еквівалентна площі опромінення).

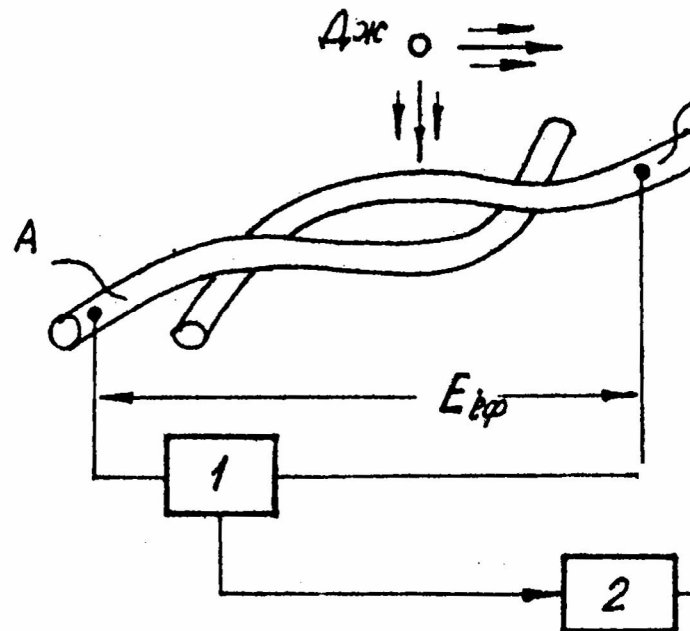
Для конкретного випадку зварювання термопар із вольфрам-ренієвих термоелектродів ВР 5 і ВР 20 ця залежність приймає вид:

$$E_{ef} = 6,92 - 0,24x_1 + 0,82x_2 + 0,52x_1x_2 + 0,914x_1^2 - 0,548x_2^2 \quad (5)$$

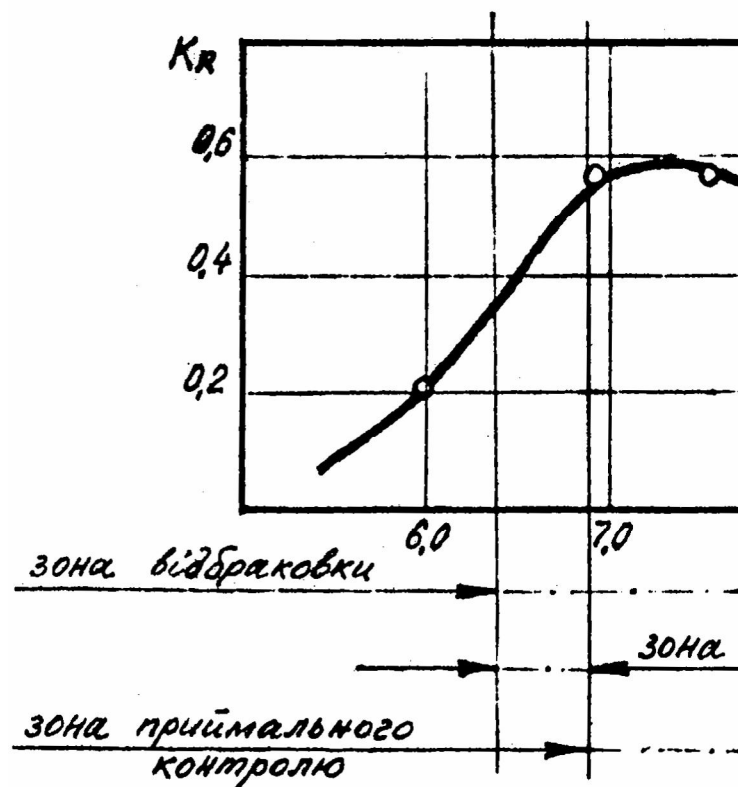
Отже, співставляючи одержані при зварюванні значення  $E_{ef}$  із розрахованими, можна оцінювати варіацію технологічних параметрів режиму зварювання.

Оскільки замір  $E_{ef}$  відбувається в процесі зварювання, то часові затрати на контроль прямо

включаються в цикл зварювання виробу. Крім того,  $E_{ef}$  вимірюється для кожного зварного з'єднання, чим досягається 100% неруйнівний контроль всієї партії виробів. Отже, високі техніко-економічні показники контролю, суміщеного в один цикл із зваркою, дають можливість досягти неперервного контролю за відтворюваністю процесу від зварки до зварки.



Фіг. 1



Фіг. 2