

К. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО<sup>1</sup>, к. т. н. А. Г. ДУБКО<sup>1, 2</sup>,  
д. т. н. В. М. СИДОРЕЦЬ<sup>2</sup>, к. т. н. Ю. В. БОНДАРЕНКО<sup>1</sup>

Україна, м. Київ, <sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; <sup>2</sup>Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ  
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com, andreyies17@gmail.com,  
sydorvn@gmail.com, bondarenko.julie@gmail.com

## ЗАСТОСУВАННЯ ДИЛАТОМЕТРИЧНОГО ЕФЕКТУ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ

*З метою покращення якості зварних з'єднань запропоновано використання дилатометричного ефекту для керування процесом контактного точкового зварювання, а саме переміщенням зварювальних електродів. Для його відстеження запропоновано застосування сучасних інерціальних MEMS-давачів. Розроблено експериментальну вимірну систему, яка обробляє сигнал MEMS-давачів і робить його придатним для використання як сигналу зворотного зв'язку. Проведено оцінку можливостей вимірювання мікропереміщень електродів, що спостерігаються в результаті дилатометричного ефекту при контактному зварюванні, за допомогою MEMS-давачів. Запропоновано використання цього способу і устаткування для зварювання як металів, так і живих м'яких тканин. Результати попередніх досліджень свідчать, що запропоновані рішення є доцільними і перспективними.*

*Ключові слова: контактне зварювання, теплове розширення матеріалу, дилатометричний ефект, керування, якість зварювання, живі тканини.*

Контактне точкове зварювання знайшло широке застосування в електронній промисловості та приладобудуванні. Існує ряд випадків, коли переваги точкового зварювання незаперечні в порівнянні з паянням. Це, насамперед, екстремальні умови експлуатації електронних виробів, наприклад високий рівень радіації або дія короткочасних теплових та світлових імпульсів. Очевидно, що відповідальні зварні з'єднання повинні мати покращені показники якості, які можуть бути досягнуті через застосування автоматичного керування зварювальним процесом.

На сьогодні відомо багато способів автоматичного керування, що використовуються в контактному зварюванні, серед яких, в першу чергу, відзначимо керування зварювальним струмом [1, 2]. Формування переднього фронту зварювального імпульсу струму забезпечує бездефектність зварного з'єднання, тривалість амплітудного значення імпульсу струму визначає його необхідні розміри, а форма спаду імпульсу визначає термічний цикл, що є важливим для отримання необхідної мікроструктури металу зварної точки та зони термічного впливу [2]. Значний вплив на якість з'єднання має також зусилля, що прикладається до зварювальних електродів і викликає їх переміщення

[1–3]. Керування цим переміщенням спільно з керуванням струмом відкриває нові перспективи поліпшення якості з'єднань. При цьому залишається відкритим і актуальним питання реєстрації таких переміщень з метою задіяння відповідних сигналів у колах зворотного зв'язку.

Великий досвід Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона з контактного зварювання металів сприяв розробці технології з'єднання зварюванням м'яких живих тканин, яка сьогодні знайшла широке застосування в різних областях хірургії: загальній та абдомінальній хірургії, колопроктології, пластичній і косметичній хірургії, гінекології, мамології, урології, хірургії травм, судинній хірургії, онкології, оториноларингології, офтальмології [4–9]. В основі технології зварювання тканин лежать фізичні явища, подібні до тих, на яких ґрунтується контактне зварювання металів опором, тому така технологія не вимагає додаткових витратних матеріалів (ниток, металевих скоб, клею) [10, 11]. Процес зварювання м'яких живих тканин захищено патентами України [12–14] та закордонними патентами [15–17].

На **рис. 1** представлена схема контактного зварювання артерії. Між електродами 1 затискається артерія 2. До електродів прикладається зусилля стиснення  $F_c$  та напруга високої частоти  $\sim U$ . В результаті утворюється так звана колагенова кліпса. Основну роль в такому з'єднанні відіграє взаємодія колагенових структур [18].

*Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (ДБ № 0116U006924).*

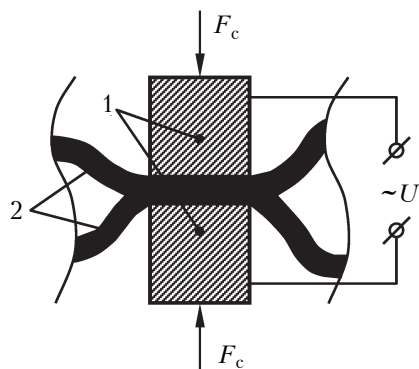


Рис. 1. Схема контактного зварювання артерії:  
1 – електроди; 2 – стінки артерії

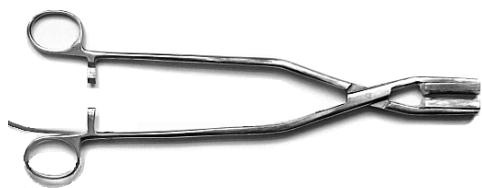


Рис. 2. Біполярні затискачі для зварювання судин

На **рис. 2** показані біполярні електрохірургічні затискачі для зварювання судин.

Враховуючи важливість сфери застосування технології, що розглядається, значна увага має бути приділена якості отримуваних в результаті зварювання з'єднань живих тканин. Відзначимо також, що високі показники міцності з'єднань в даному випадку не гарантують якість. Молекули білку, що коагулюють, не мають втрачати здатності до регенерації та відновлення в післяопераційний період. Тому дуже актуальною є задача ефективного контролю процесу формування з'єднань безпосередньо в ході проведення операції.

Для організації такого контролю може бути використаний дилатометричний ефект (збільшення лінійних розмірів і об'єму матеріалу при нагріванні під час зварювання), що дозволить знизити вплив людського фактору, а отже, підвищити якість проведення хірургічних операцій та знизити тривалість післяопераційної реабілітації пацієнтів.

Практична реалізація ідеї використання дилатометричного ефекту для керування зварюванням м'яких живих тканин може базуватись на організації замкненої системи автоматичного керування за таким параметром як мікропереміщення рухомого електрода в результаті зміни розмірів металевих деталей або біологічних тканин в процесі зварювання. В цьому контексті стає актуальною проблема вимірювання мікропереміщень з високою точністю і за дуже малі проміжки

часу. Перспективним для вирішення цієї задачі видається застосування сучасних мікроелектромеханічних давачів (MEMS), що мають високу точність та швидкодію.

Метою даної роботи є оцінка можливостей вимірювання переміщень зварювальних електродів, спричинених дилатометричним ефектом, за допомогою MEMS-давачів і виявлення перспектив застосування отриманих в такий спосіб сигналів переміщення для керування процесом контактного зварювання як металевих виробів, так і м'яких живих тканин.

### Використання дилатометричного ефекту для керування процесом контактного зварювання

Відомо [3], що за температурою  $T$  твердого тіла його довжина  $l_T$  та об'єм  $V_T$  обчислюються як

$$l_T = l_0(1 + \alpha_l T), \quad (1)$$

$$V_T = V_0(1 + \beta_V T), \quad (2)$$

де  $l_0$ ,  $V_0$  – довжина і об'єм тіла за початкової температури  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ;

$\alpha_l$ ,  $\beta_V$  – термічні коефіцієнти лінійного і об'ємного розширення [16].

В процесі точкового контактного зварювання переміщення електрода відбувається під дією зовнішньої сили, якій протидіє теплове розширення металу, що пов'язано зі зростанням розмірів литої зони зварного з'єднання [1, 3, 19]. Відносна зміна об'єму при нагріванні деяких металів ( $\Delta V = V_T / V_0 - 1$ ) представлена графіками на **рис. 3**. При контактному зварюванні живих тканин протидія обумовлена зміною пружності колагену при його нагріванні. Треба відзначити, що пружність колагену змінюється, доки біологічна тканина залишається живою, тобто такою, що не втратила здатність відновлювати свою функціональність в подальшому.

На **рис. 4** показано переміщення рухомого електрода від теплового розширення. При цьому зусилля стиснення  $F_c$  врівноважується реакцією нижньої консолі  $F_p$ , а внутрішні сили  $F_b$  прагнуть розсунути електроди на величину  $\Delta h_{ел}$  [3].

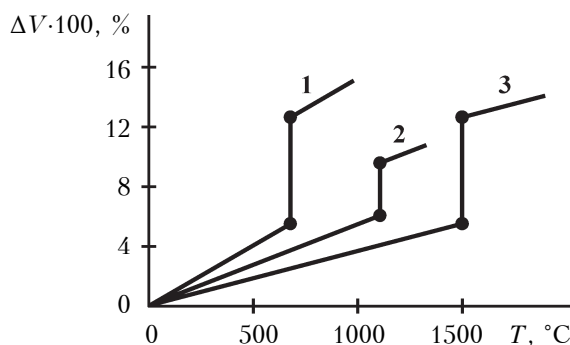


Рис. 3. Відносна зміна об'єму при нагріванні алюмінію (1), міді (2) та сталі (3) [3]

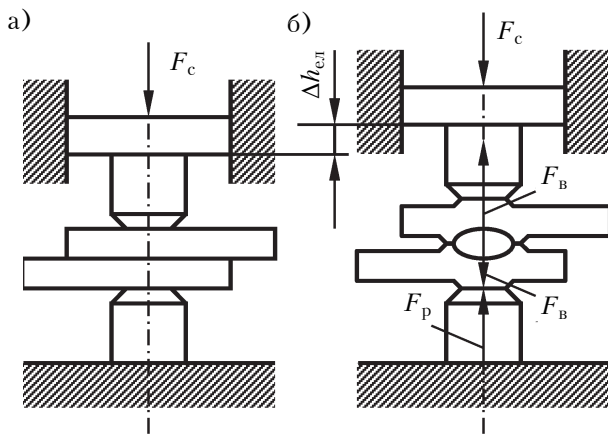


Рис. 4. Переміщення рухомого електрода до дії теплового розширення (а) та після неї (б) на прикладі контактної зварювання металу [3]

В умовах точкового зварювання збільшення товщини та об'єму деталей відбувається переважно в напрямку вертикальної осі, оскільки розширення в напрямку горизонтальної осі стримується більш холодною масою сусідніх ділянок [3].

Теплове розширення  $\Delta_p$  металу при зварюванні викликає переміщення (розсування) електродів машини, в основному — верхнього рухомого електрода. Однак виміряні значення  $\Delta h_{ел}$  значно менші за розрахункові  $\Delta_p$  (рис. 5, а) внаслідок вдавлювання електродів ( $\Delta_B$ ) в матеріал, тобто

$$\Delta h_{ел} = \Delta_p - \Delta_B \quad (3)$$

Великі значення  $\Delta h_{ел}$  реєструються при зварюванні металів з великим опором деформації, при використанні жорстких режимів зварювання і машин з великою жорсткістю нижнього електрода та малими силами тертя в приводі рухомого електрода.

Помітне переміщення верхнього електрода спостерігається з моменту розплавлення металу (появи ядра) і далі відбувається у відповідності зі змінами температурного поля і зростанням розмірів ядра. Максимальні значення  $\Delta h_{ел}$  зазвичай відповідають моменту вимикання струму при зварюванні уніполярним струмом (рис. 5, а) [3].

Зв'язок переміщення  $\Delta h_{ел}$  зі змінами температурного поля наочно спостерігається при зварюванні тонких деталей машиною змінного струму з великими кутами керування тиристорів (рис. 5, б), коли переміщення електрода відбувається поривчасто, відповідно до імпульсів струму і зміни температурного поля. Глибина переміщень електрода залежить від теплопровідності, термічних коефіцієнтів лінійного і об'ємного розширення, теплоємності

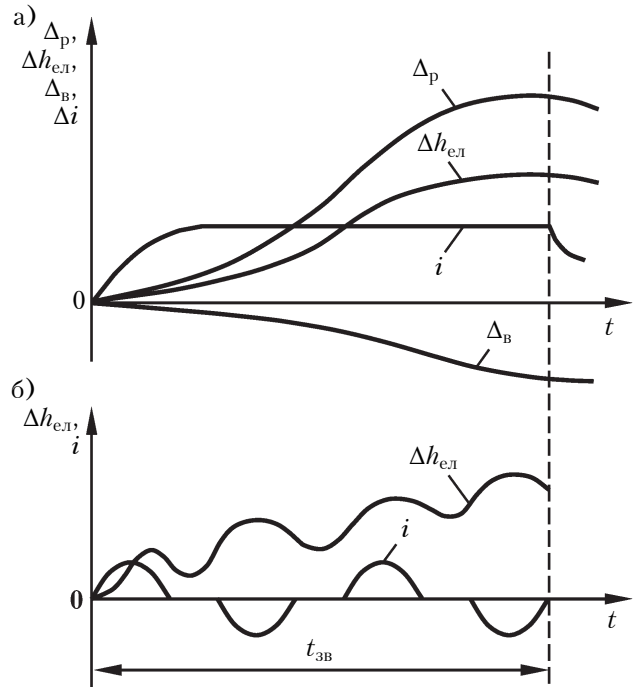


Рис. 5. Характер теплового розширення металу  $\Delta_p$ , переміщення електрода  $\Delta h_{ел}$  і пластичної деформації (глибини вм'ятини  $\Delta_B$ ) впродовж зварювального циклу  $t_{зв}$  імпульсом постійного струму (а) і змінним струмом (б) [3]

і прихованої теплоти плавлення зварюваного матеріалу.

Переміщення рухомого електрода внаслідок дилатометричного ефекту є узагальнюючим параметром, пов'язаним з якістю точкового контактної зварювання металів. Між величиною переміщення електрода і об'ємом розплавленого металу існує прямий взаємозв'язок. Відомо, що збільшення лінійного розміру деталей при зварюванні становить 8–10% від їх сумарної товщини [1, 3]. Таким чином, переміщення електрода може ефективно використовуватись для неруйнівного контролю розмірів литого ядра. Організація системи автоматичного керування за цим параметром дозволить забезпечити задану якість зварювання.

Розглянемо відомий варіант побудови установки для зварювання металів з системою автоматичного керування за параметром переміщення електродів [1].

#### Вимірювання переміщення електродів за допомогою індуктивних датчиків

На рис. 6 схематично показана установка контактної зварювання з датчем переміщення електродів. Розширення деталей викликає переміщення електродотримача разом з верхньою рухомою частиною зварювальної машини. Величина цього переміщення вимірюється датчем, який жорстко зв'язаний з нерухомою ча-

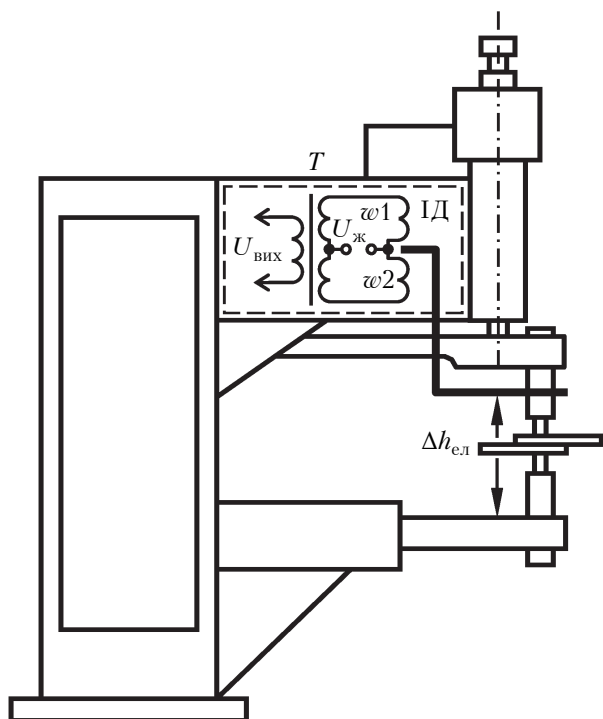


Рис. 6. Установка контактнього зварювання з індуктивним давачем переміщення електродів

стиною зварювальної машини. Рухомий елемент давача зв'язаний з електродотримачем.

У найпростішому випадку використовуються контактні електромеханічні давачі, що спрацьовують при переміщенні електрода на встановлену величину. Для побудови систем автоматичного керування застосовують індуктивні давачі, які здатні вимірювати малі переміщення (рис. 6). Індуктивний давач (ІД) складається з двох котушок  $w_1$  і  $w_2$ , встановлених на магнітопроводах, жорстко пов'язаних з нерухомою частиною зварювальної машини. Котушки послідовно включені з обмотками диференціального трансформатора Т.

У повітряному проміжку магнітопроводів розташовано якір, механічно пов'язаний з верхнім рухомим електродотримачем. В процесі зварювання електродотримач під дією сил теплового розширення переміщується вгору на величину  $\Delta h_{ел}$  і змінює індуктивний опір обмоток  $w_1$  і  $w_2$ . На виході трансформатора Т з'являється сигнал неузгодженості, пропорційний  $\Delta h_{ел}$ , який використовується в системі автоматичного керування для контролю часу протікання зварювального струму.

В деяких випадках представляє інтерес вимірювання не тільки переміщення  $\Delta h_{ел}$ , але й швидкості його зміни  $dh/dt$ , оскільки ця величина характеризує швидкість нагрівання та охолодження, тобто термічний цикл зварювання, яким визначається структура металу ядра, а отже, і якість зварного з'єднання.

Для вимірювання швидкості зміни переміщення вихідний сигнал мостової вимірювальної системи диференціюється і надсилається до вузла порівняння. Якщо під дією збурень швидкість нагрівання виходить за встановлені межі, сигнал неузгодженості змінює величину зварювального струму таким чином, щоб зменшення сигналу  $dh/dt$  відповідало збільшенню струму, і навпаки. Коли величина переміщення  $\Delta h_{ел}$  досягає заданого значення, що відповідає оптимальному розміру ядра зварної точки, система автоматичного керування вимикає струм [1].

Описана система показала свою ефективність при контактному зварюванні металів, проте використання такого підходу для організації керування процесом зварювання живих м'яких тканин неможливе через такі принципові складнощі, як недостатні точність та швидкодія індуктивних давачів, а також неприпустима для хірургії громіздкість системи на їх основі.

#### Вимірювання переміщення електродів за допомогою MEMS-давачів

В теперішній час для реєстрації руху об'єкта все ширше використовують MEMS-давачі. За допомогою MEMS-гіроскопів вимірюють кутові швидкості, за допомогою MEMS-акселерометрів — прискорення.

Загальною конструктивною ознакою MEMS є використання в них різних за конфігурацією двоступеневих пружних підвісів чутливого елемента (ЧЕ). Принцип роботи MEMS полягає у створенні відносно корпусу знакозмінного поступального або обертального руху ЧЕ за одним зі ступенів свободи та у вимірюванні переміщень за іншим ступенем свободи, що виникають під дією коріолісових сил або гіроскопічних моментів за наявності переносної кутової швидкості корпусу. На рис. 7 цей принцип пояснюється на прикладі MEMS з двоступеневим пружним підвісом і поступальним

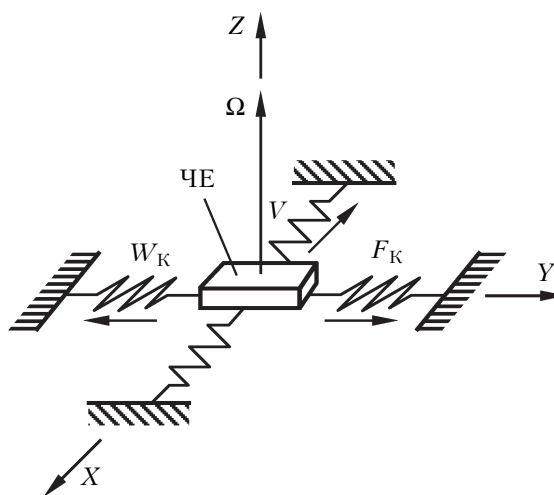


Рис. 7. Принцип дії MEMS-гіроскопа



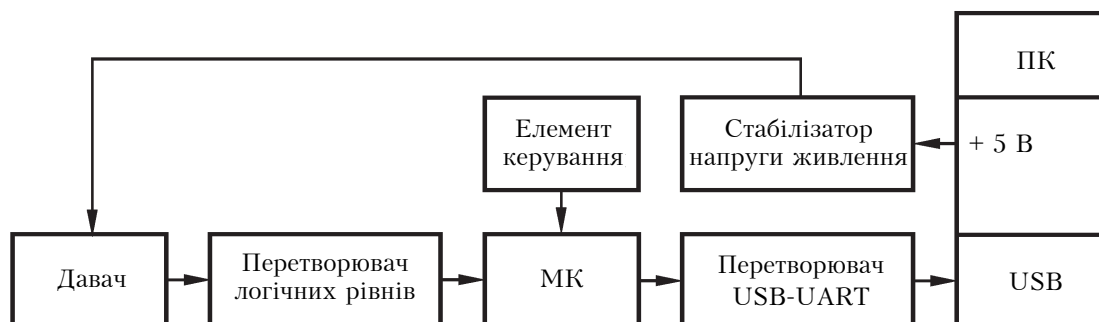


Рис. 8. Структура системи вимірювання мікропереміщень на основі MEMS-давача

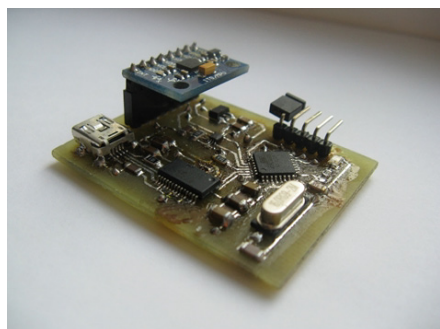


Рис. 9. Зовнішній вигляд розробленого експериментального пристрою

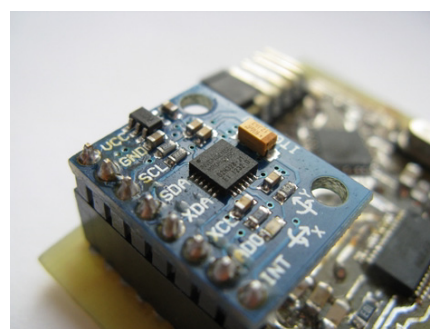


Рис. 10. Зовнішній вигляд плати давача MPU-6050

переміщенням ЧЕ. За наявності знакозмінної відносної лінійної швидкості  $V$  вздовж осі  $OX$  і переносної вимірюваної кутової швидкості  $\Omega$  навколо осі  $OZ$  з'являється знакозмінне прискорення Коріоліса  $W_K$  і відповідна йому сила  $F_K$  уздовж осі  $OY$ .

*Апаратна частина експериментальної вимірювальної системи*

Для оцінки можливостей керування процесом контактного зварювання металів та м'яких живих тканин шляхом контролю дилатометричного ефекту за допомогою MEMS-давачів розроблено експериментальну вимірювальну систему, апаратна частина якої включає наступні елементи:

- давач з шістьма ступенями свободи (тривісний гіроскоп і тривісний акселерометр);
- мікроконтролер (МК);
- перетворювач логічних рівнів інформаційної шини між давачем та МК;
- елемент керування;
- персональний комп'ютер (ПК);
- перетворювач інтерфейсів USB-UART;
- стабілізатор напруги для живлення інерційного давача.

Структурну схему системи наведено на **рис. 8**. Давач містить у собі тривісний акселерометр і тривісний гіроскоп. Через цифровий інтерфейс дані з давача надходять до МК для подальшої обробки. Після цього сигнал передається до ПК через цифровий інтерфейс. Живлення схеми здійснюється з ПК. Для забезпечення функціонування давача необхідними є

стабілізатор напруги та перетворювач логічних рівнів на шині даних. Елемент керування призначений для запуску або призупинення роботи давача.

Зовнішній вигляд розробленого експериментального пристрою наведено на **рис. 9**. Плата використаного в розробці давача MPU-6050 [20] показана на **рис. 10**, а його параметри зведені в **таблиці**.

*Параметри давача MPU-6050 [20]*

Параметр	Значення
Кількість осей акселерометра	3 (X, Y, Z)
Діапазон прискорень, $\pm g$	2 – 16
Кількість осей гіроскопа	3 (X, Y, Z)
Діапазон кутових швидкостей, $^{\circ}/c$	250 – 2000
Робочий діапазон температур	-40...+85°C

*Програмна частина експериментальної вимірювальної системи*

Програмну частину пристрою розроблено для мікроконтролера. Вона відповідає за зчитування даних з інерційного MEMS-давача MPU-6050 та їх передачу до ПК для подальшої обробки.

Блок-схема алгоритму роботи розробленого програмного забезпечення наведена на **рис. 11**. Програма працює наступним чином. Після подачі живлення на пристрій відбувається ініціалізація портів введення-виведення МК (налаштування портів на роботу як входних або як вихідних). Наступним кроком відбувається на-

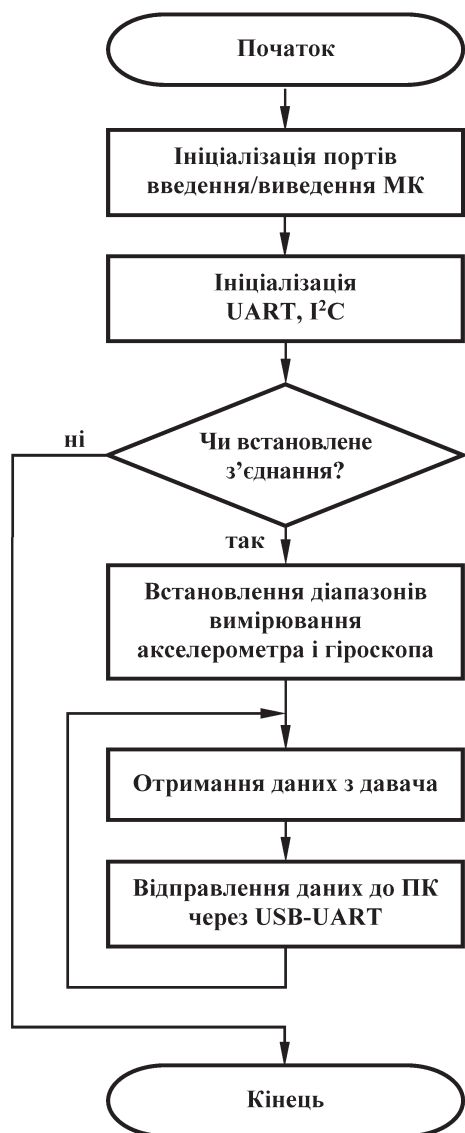


Рис. 11. Алгоритм роботи пристрою для вимірювання мікропереміщень

лаштування послідовних інтерфейсів передачі даних UART та I2C і встановлення з'єднання з датчиком MPU-6050. Про стан з'єднання (вдале чи ні) до ПК відправляється відповідне повідомлення. Далі відбувається налаштування діапазонів вимірювання гіроскопа та акселерометра. Після цього з кожної осі акселерометра та гіроскопа в однакові моменти часу циклічно отримуються дані, які надсилаються до персонального комп'ютера.

Слід відзначити, що для інерційного MEMS-датчика MPU-6050 існують готові бібліотеки, завдяки чому полегшується його програмування.

#### Дослідження характеристик розробленої системи

В процесі досліджень була проведена оцінка можливості застосування MEMS-датчиків для контролю дилатометричного ефекту при удосконаленні процесу з'єднання контактним

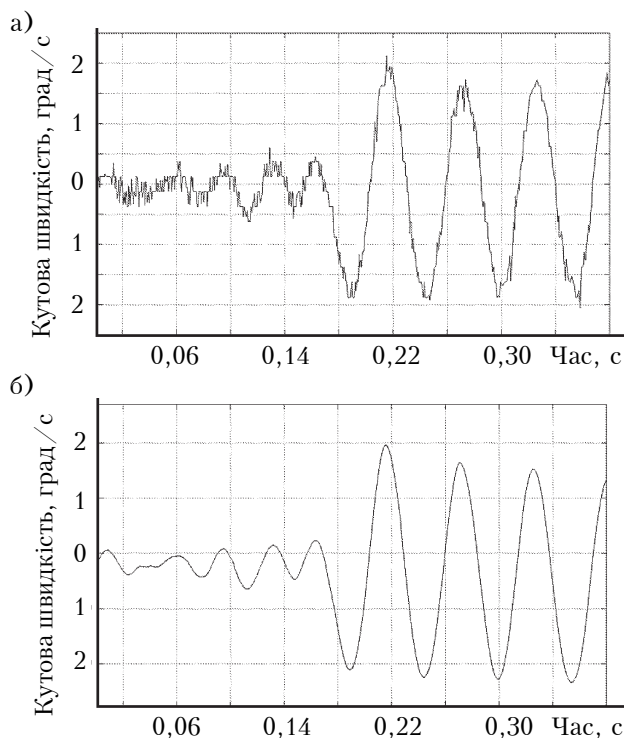


Рис. 12. Діаграми кутової швидкості в часі

зварюванням. При цьому як датчики використовувалися акселерометр типу MMA7260Q, гіроскоп типу MLX90609, а також мікросхема, яка поєднує функції акселерометра і гіроскопа — MPU-6050.

На рис. 12 наведено часові діаграми кутової швидкості. Діаграма, отримана за допомогою гіроскопа, представлена за результатами вимірювання безпосередньо з датчика (рис. 12, а), а діаграма, отримана за допомогою акселерометра, представлена за результатами вимірювання прискорення з подальшим інтегруванням і відповідними перетвореннями (рис. 12, б).

Величини переміщень, які вдалося зареєструвати, знаходяться в діапазоні від одиниць мікрметрів (мінімум 5 мкм) до одиниць міліметрів. При цьому швидкість передачі даних системи дорівнює 1 мс. Слід відзначити, що ці величини відповідають параметрам переміщень, характерним для дилатометричного ефекту, що спостерігається в процесі зварювання (десятки мікрон за одиниці мілісекунд).

Окремо слід також відзначити мініатюрні габарити MEMS-датчиків. Розміри мікросхеми датчика складають приблизно 5×5 мм, а розміри плати, на якій встановлено мікросхему, дорівнюють 32×38 мм. Мініатюрність датчиків є важливою для забезпечення компактності електрохірургічного інструменту та устаткування.

#### Висновки

Дослідження показників точності і швидкодії розробленого експериментального вимі-

рювального пристрою на основі MEMS-давачів довело його спроможність рееструвати значення переміщень зварювальних електродів, спричинених дилатометричним ефектом, характерні для контактного зварювання як металевих виробів, так і живих м'яких тканин.

Таким чином, побудову систем автоматичного керування за параметром переміщення на основі використання дилатометричного ефекту та MEMS-давачів можна вважати доцільною і перспективною, а застосування таких систем можна рекомендувати для вдосконалення машин контактної зварювання металів та електрохірургічного обладнання.

Для впровадження запропонованого підходу в хірургічну практику необхідна експериментальна перевірка і підтвердження отриманих результатів шляхом застосування контактної зварювання до різних типів біологічних тканин тварин і людини.

#### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Автоматизация сварочных процессов / Под ред. В.К. Лебедева, В.П. Черныша. – Киев: Вища шк., Гол. изд-во, 1986.
2. Bondarenko, O.F., Bondarenko I.V., Safronov P.S., Sydorets V.M. Current and force control in micro resistance welding machines. Review and development // 2013 8<sup>th</sup> International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE). – Ljubljana, Slovenia. – 2013. – P. 298–303. – <https://doi.org/10.1109/CPE.2013.6601173>.
3. Орлов Б.Д., Чакалев А.А., Дмитриев Ю.В. и др. Технология и оборудование контактной сварки: Учебник для машиностр. вузов. – Москва: Машиностроение, 1986.
4. Paton В.Е. Electric welding of soft tissues in surgery // The Paton Welding Journal. – 2004. – N 9. – P. 6–10.
5. Paton В.Е. Welding and related technologies for medical application // The Paton Welding Journal. – 2008. – N 11. – P. 11–19.
6. Тканесохраняющая высокочастотная электросварочная хирургия. Атлас / Под ред. Б.Е. Патона, О.Н. Ивановой. – Киев: Наукова думка, 2009.
7. Sydorets V. Lebedev A., Dubko A. Mathematical modeling of the current density distribution in a high-frequency

- electrosurgery // 16<sup>th</sup> Int. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering. – Lviv, Ukraine. – 2015. – P. 215–217. – <https://doi.org/10.1109/CPEE.2015.7333379>.
8. Linchevskyy O. Makarov A., Getman V. Lung sealing using the tissue-welding technology in spontaneous pneumothorax // European Journal of Cardio-thoracic Surgery. – 2010. – N 5. – P. 1126–1128.
  9. Umanets, N.N., Pasyechnikova N.V., Naumenko V.A., Henrich P.B. High-frequency electric welding: a novel method for improved immediate chorioretinal adhesion in vitreoretinal surgery // Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology. – 2014. – N 11. – P. 1697–1703.
  10. Лебедев В.К., Лебедев А.В., Буштетдт Ю.П. та ін. Применение сварки в хирургии // Сварочное производство. – 2008. – № 11. – С. 23–25.
  11. Лебедев А.В., Дубко А.Г. Особенности применения теории контактной сварки металлов к сварке живых тканей // Технічна електродинаміка. – 2012. – Вип. 2. – С. 187–192.
  12. Пат. 39907 України. Спосіб з'єднання судин та інших порожнистих органів тварин або людини й пристрій для його здійснення / Б.Є. Патон, В.К. Лебедев, Д. С. Ворона та ін. – 2001. – Бюл. № 6.
  13. Пат. 44805 України. Спосіб з'єднання м'яких біологічних тканин і улаштування для його здійснення / Б.Є. Патон, В.К. Лебедев, Д.С. Ворона та ін. – 2002. – Бюл. №3.
  14. Пат. 74881 Україна. Спосіб з'єднання м'яких біологічних тканин і улаштування для його здійснення / Б.Є. Патон, В.К. Лебедев, О.М. Иванова та ін. – 2006. – Бюл. №2.
  15. Пат. 2002/0091385 USA. Bonding of soft biological tissues by passing high frequency electric current therethrough / V.K. Lebedev et al. – 11.07.2002.
  16. Пат. 6733498 USA. System and method for control of tissue welding / В.Е. Paton et al. – 21.08.2003.
  17. Пат. 2294171 России. Способ сварки мягких тканей животного и человека / Б.Е. Патон и др. – 27.02.2007.
  18. Патон Б.Є., Булавін Л.А., Актан О.Ю. та ін. Структурні перетворення колагену при електрозварюванні м'яких живих тканин // Доповіді Національної академії наук України. – 2010. – № 2. – С. 94–101.
  19. Козловский С.Н. О выборе параметров дилатометрического контроля и регулировании процесса точечной сварки // Сварочное производство. – 1991. – № 9. – С. 27–31.
  20. MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTracking™ Devices [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>. – Назва з екрану.

Дата надходження рукопису до редакції 27.03 2017 р.

К. т. н. А. Ф. БОНДАРЕНКО<sup>1</sup>, к. т. н. А. Г. ДУБКО<sup>1, 2</sup>, д. т. н. В. Н. СИДОРЕЦ<sup>2</sup>, к. т. н. Ю. В. БОНДАРЕНКО<sup>1</sup>

Україна, г. Киев, <sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <sup>2</sup>Інститут електросварки ім. Е. А. Патона НАНУ

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com, andreyies17@gmail.com, sydorvn@gmail.com, bondarenko.julie@gmail.com

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

С целью улучшения качества сварных соединений предложено использовать дилатометрический эффект для управления процессом контактной точечной сварки, а именно перемещением сварочных электродов. Для его отслеживания предлагается применять современные инерциальные MEMS-датчики. Разработана экспериментальная измерительная система, которая обрабатывает сигнал MEMS-датчиков и делает его пригодным для использования в качестве сигнала обратной связи. Проведена оценка возможностей измерения микроперемещений электродов, наблюдаемых в результате дилатометрического эффекта при контактной сварке, с помощью MEMS-датчиков. Предложено использовать данный способ и оборудование как для сваривания металлов, так и живых мягких тканей. Результаты предварительных исследований показали, что предложенные решения являются целесообразными и перспективными.

Ключевые слова: контактная сварка, тепловое расширение материала, дилатометрический эффект, управление, качество сварки, живые ткани.

APPLYING OF DILATOMETRIC EFFECT FOR RESISTANCE WELDING  
AUTOMATION

The important issue of resistance spot welding control to obtain high quality welded joints, especially in living tissue welding, is considered. The actual state of the issue is described and analyzed. In order to improve the quality of welded joints, the applying of dilatometric effect to control the resistance spot welding process, namely of shifting the welding electrodes, is suggested. To register the shifting, the use of modern inertial microelectromechanical sensors (MEMS) is proposed. The experimental measuring system, which processes the MEMS-sensor signal and makes it suitable for use as a feedback signal, is developed. The structure and operational algorithm of the system are described. The abilities of measuring with MEMS-sensors the values of electrode shifting caused by dilatometric effect under resistance welding are assessed. These method and equipment are recommended for welding the metals, as well as for welding the living tissues. The results of preliminary studies prove the advisability and relevance of the suggested solutions.

**Keywords:** resistance welding; thermal expansion of material; dilatometric effect; control; welding quality; living tissue.

## REFERENCES

1. *Avtomatizatsiya svarochnykh protsessov* [Automation of welding processes] // Ed. by V.K. Lebedev, V.P. Chernysh. Kyiv: Vyshcha shk., Golovnoye izd-vo, 1986, 296 p. (Rus)
2. Bondarenko O.F., Bondarenko I.V., Safronov P.S., Sydorets V.M. Current and Force Control in Micro Resistance Welding Machines. Review and Development // *8th IEEE International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, Slovenia, Ljubljana, 2013, pp. 298–303. doi:10.1109/CPE.2013.6601173.
3. Orlov B.D., Chakalev A.A., Dmitriyev Yu.V. et al. *Tekhnologiya i oborudovaniye kontaktnoy svarki* [Technology and equipment for resistance welding]: *Textbook for machine-building universities*. Moscow, Mashinostroyeniye, 1986, 352 p. (Rus)
4. Paton B.E. Electric welding of soft tissues in surgery. *The Paton Welding Journal*, 2004, no 9, pp. 6-10.
5. Paton B.E. Welding and related technologies for medical application. *The Paton Welding Journal*, 2008, no 11, pp. 11-19.
6. *Tkanesokhranyayushchaya vysokochastotnaya elektrosvarochnaya khirurgiya. Atlas* [Tissue-preserving high-frequency electric welding surgery. Atlas]. Ed. by B.E. Paton, O.N. Ivanova. Kyiv, Naukova dumka, 2009, 199 p. (Rus)
7. Sydorets V., Lebedev A., Dubko A. Mathematical Modeling of the Current Density Distribution in a High-Frequency Electrosurgery. *16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Ukraine, Lviv, 2015, pp. 215-217. doi: 10.1109/CPEE.2015.7333379.
8. Linchevskyy O., Makarov A., Getman V. Lung sealing using the tissue-welding technology inspontaneous pneumothorax. *European Journal of Cardio-thoracic Surgery*, 2010, no 5, pp. 1126-1128.
9. Umanets N. N., Pasychnikova N. V., Naumenko V. A., Henrich P. B. High-frequency electric welding: a novel method for improved immediate chorioretinal adhesion in vitreoretinal surgery. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 2014, no 11, pp. 1697-1703.
10. Lebedev V.K., Lebedev A.V., Bushtedt Yu.P., Dubko A.H., Shelest N.A., Vasilchenko V.A., Sidorenko D.F., Sazonov V.Ya., Masalov D.V. Primeneniye svarki v khirurgii [The use of welding in surgery]. *Svarochnoye proizvodstvo*, 2008, no 11, pp. 23-25. (Rus)
11. Lebedev A.V., Dubko A.H. Osobennosti primeneniya teorii kontaktnoy svarki metallov k svarke zhivykh tkaney [Features of applying of the theory of resistance welding of metals for the welding of living tissues]. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2012, Iss. 2, pp. 187-192. (Rus)
12. Pat. 39907 Ukraine. *Sposib ziednannia sudyn ta inshykh porozhmystykh orhaniv tvaryn abo liudyny y prystrii dlia yoho zdiisnennia* [The method of bonding the vessels and other hollow bodies of animals or humans and a device for its implementation]. B.E. Paton, V.K. Lebedev, D.S. Vorona, V.I. Karchemskiy, Yu.O. Furmanov, O.V. Lebedev, V.A. Vasylychenko, D.F. Sydorenko, V.P. Yemchenko-Rybko, O.M. Ivanova, O.Yu. Furmanov, Ye.V. Zhyvodernikov, A.O. Lyashenko, I.M. Savytska, 16.07.2001. (Rus)
13. Pat. 44805 Ukraine. *Sposib ziednannia miakykh biolohichnykh tkanyn i ulashtuvannia dlia yoho zdiisnennia* [The method of bonding the soft biological tissues and equipment for its implementation]. B.E. Paton, V.K. Lebedev, D.S. Vorona, V.I. Karchemskiy, Yu.O. Furmanov, O.V. Lebedev, V.A. Vasylychenko, D.F. Sydorenko, V.P. Yemchenko-Rybko, O.M. Ivanova, O.Yu. Furmanov, Ye.V. Zhyvodernikov, A.O. Lyashenko, 15.03.2002. (Rus)
14. Pat. 74881 Ukraine. *Sposib ziednannia miakykh biolohichnykh tkanyn i ulashtuvannia dlia yoho zdiisnennia* [The method of bonding the soft biological tissues and equipment for its implementation]. B.E. Paton, V.K. Lebedev, O.M. Ivanova, N.A. Chvertko, Bushtedt Yu.P., M.A. Shelest, O.V. Lebedev, 15.02.2006. (Ukr)
15. Pat. 2002/0091385 A1 US. *Bonding of soft biological tissues by passing high frequency electric current therethrough*. Lebedev, A.V. Lebedev, D.S. Vorona, V.I. Karchemsky, Y.A. Furmanov, V.A. Vasilchenko, D.F. Sidorenko, V.P. Iemchenko-Ribko, O.N. Ivanova, Y.V. Zvodernikov, A.A. Lyashenko, I.M. Savitskaya, Publ. Jul. 11, 2002.
16. Pat. 6733498 US. *System and method for control of tissue welding*. B.E. Paton, V.K. Lebedev, A.V. Lebedev, Y.A. Masalov, O.N. Ivanova, M.P. Zakharash, Y.A. Furmanov, Prior. 19.02.2002; Publ. Aug. 21.2003.
17. Pat. 2294171 Russia. *Sposob svarki miahkikh tkanei zhivoynohu i cheloveka* [The method of welding of soft tissue of animals and humans]. B.E. Paton, V.K. Lebedev, A.V. Lebedev, Y.A. Masalov, O.N. Ivanova, M.P. Zakharash, Y.A. Furmanov, Prior. 19.06.02; Publ. 27.02.07. (Rus)
18. Paton B.E., Bulavyn L.A., Aktan O.Yu., Zabashta Yu.F., Lebediev O.V., Podpriatov S.Ye., Dubko A.H., Ivanova O.M. *Strukturni peretvorennia kolahenu pry elektrozvariiuvanni miakykh zhyvykh tkanyn* [Structural collagen transformations in electric welding of soft living tissues] // *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, 2010, no 2, pp. 94-101. (Rus)
19. Kozlovskiy S.N. O vybore parametrov dilatometri-cheskoho kontrolya i rehulirovaniy protsessa tochechnoy svarki [About the choice of parameters of dilatometric control and regulation of spot welding process]. *Svarochnoye proizvodstvo*, 1991, no 9, pp. 27-31. (Rus)
20. MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTracking™ Devices [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>. – Title from the screen.