

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, РЕЄСТРАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ТА КОНТРОЛЮ В ПРОЦЕСІ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБ МАГНІТОКЕРОВАНОЮ ДУГОЮ

М.П. Коваль, С.І. Кучук-Яценко, В.С. Качинський

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Визначено технічні вимоги до основних елементів системи управління. Описано структурну будову системи управління. Досліджено вплив параметрів процесу пресового зварювання магнітокерованою дугою на якість отримуваних з'єднань. Визначено межі коливань значень параметрів та їх вплив на якість отриманого з'єднання, розроблено програмне забезпечення системи оцінки якості зварних з'єднань. Бібліогр. 7, рис. 6.

Ключові слова: технологія зварювання, пресове зварювання магнітокерованою дугою, система управління, реєстрація параметрів, система оцінки якості отриманих з'єднань, формування з'єднань

Швидкий розвиток та широке застосування систем управління у зварювальному виробництві [1] потребує від розробників устаткування шукати нові шляхи та апаратну реалізацію для підвищення ефективності зварювального устаткування з метою підвищення продуктивності процесу зварювання та гарантованого отримання якісних зварних з'єднань [2, 3]. Поширення використання у різноманітних галузях промисловості пресового зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД) та розробка нових зварювальних машин для реалізації цього способу потребує удосконалення існуючих систем оцінки якості зварних з'єднань та управління.

Відоме застосування параметричного контролю якості зварювання при контактному стиковому зварюванні [4]. Використання цього методу контролю якості базується на реєстрації в реальному часі параметрів зварювання та визначенні можливих відхилень параметрів від заданих програмних значень. При цьому визначається допустимість цих відхилень та їх вплив на якість з'єднань і дається оцінка якості отриманого з'єднання.

При застосуванні у виробництві ПЗМД також використовуються відповідні програми управління основними параметрами, але параметричний контроль до цього часу не застосовувався в промислових умовах.

Відмінності технологічного процесу при контактному стиковому зварюванні та ПЗМД, а саме, наявність керуючого магнітного поля, характер зварювального струму (сталій струм), тривалість процесу, швидкість осадки та ін., унеможливають використання методів контролю [4], які використовуються при контактному стиковому зварюванні.

Метою даної роботи є розробка вихідних умов, програмного забезпечення та створення комп'ю-

теризованого комплексу управління процесом зварювання і оцінки якості зварних з'єднань, виконаних магнітокерованою дугою за аналізом технологічних параметрів.

Реалізація канонічної схеми ПЗМД відбувається за програмою, при якій зміна параметру (зварювальний струм) виконується за часом і має вигляд, наданий на рис. 1.

При виконанні нагрівання труб відбувається ступінчата зміна зварювального струму. Кожна зі ступенів струму має заздалегідь встановлену часову тривалість. Програмування величини струму за часом має такі недоліки:



Рис. 1. Зміни зварювального струму та положення рухомої частини зварювальної машини під час зварювання: S – графічне представлення положення рухомої частини зварювальної установки під час виконання процесу зварювання; A – послідовність змін зварювального струму під час нагрівання деталей; T – час перебігу процесу нагрівання та зварювання; t_1 – проміжок часу, за який відбувається ініціалізація процесу (збудження зварювальної дуги); t_2 – тривалість етапу стабілізації процесу переміщення зварювальної дуги по кромках деталей; t_3 – етап нагрівання зварюваних деталей; t_4 – витримка часу, під час якої відбувається різке підвищення зварювального струму (етап форсування процесу нагрівання); t_5 – час виконання стискання нагрітих деталей для формування з'єднання (осадка) з включеним зварювальним струмом

– низька повторюваність формування фінального температурного поля під час виконання з'єднання деталей;

- обмежена номенклатура зварюваних виробів;
- система реєстрації та оцінки якості, яка може бути застосована для такої системи, не буде мати високого ступеню достовірності про якість отриманого з'єднання.

З урахуванням досвіду експлуатації ПЗМД устаткування і враховуючи результати виконаних досліджень [5, 6] та з метою позбавлення наведених вище недоліків було апробовано спосіб ПЗМД, при якому в процесі нагрівання деталей відбувається коригування параметрів процесу без жорсткого прив'язування до тривалості програми зварювання, але з урахуванням енергетичних характеристик зварювальної дуги з метою програмованого отримання необхідного для формування з'єднання, температурного поля. Це гарантує повторюваність процесу нагрівання і формування з'єднання.

Розроблено схему системи керування та оцінки якості зварюваних з'єднань на машині К-872 та у складі:

- керуючий обчислювальний модуль (ПЕОМ);
- прилади нормалізації аналогових вхідних сигналів;
- аналогово-цифрові перетворювачі;
- датчик величини струму зварювальної дуги;
- датчик падіння напруги на дузі;
- потенціометричний датчик положення рухомої частини;
- вимірювальний датчик абсолютного тиску в гідравлічній системі.

Для забезпечення реалізації алгоритму управління та оцінки якості було виконано модернізацію шафи системи керування (рис. 2). Реєстрація технологічних параметрів процесу ПЗМД на модернізованій машині К-872 відбувається за схемою, наведеною на рис. 3.

Відповідність комп'ютерної оцінки контролю якості реальному стану речей гарантується забезпеченням системи (рис. 3) реальними вихідними



Рис. 2. Блок-схема зварювальної установки

даними, у випадку виконання ПЗМД труб такими даними є струм, напруга зварювальної дуги, спільне розташування труб в затискних пристроях машини, тиск у гідравлічній системі під час виконання осадки (як похідні від цього параметру, швидкість та величина осадки).

Для реєстрації та аналізу параметрів технологічного процесу було використано багатофункціональний пристрій USB-4711AE (рис. 4), який має наступні основні характеристики:

Максимальна частота дискретизації вхідного сигналу.....	150 кГц;
Робочий діапазон вхідної напруги, В.....	0...10
Максимальна вхідна напруга, В.....	30
Вхідний опір аналогового каналу, МОм.....	>1
Розрядність АЦП, біт.....	12
Похибка дискретизації, біт.....	+(м)1
Максимальна кількість каналів зчитування.....	16

Отримання поточних даних від датчиків системи реєстрації під час нагрівання деталей відбувається наступним чином (на прикладі отримання падіння напруги на зварювальній дузі). Вхід нормуючого вхідного підсилювача 8 підключено без-

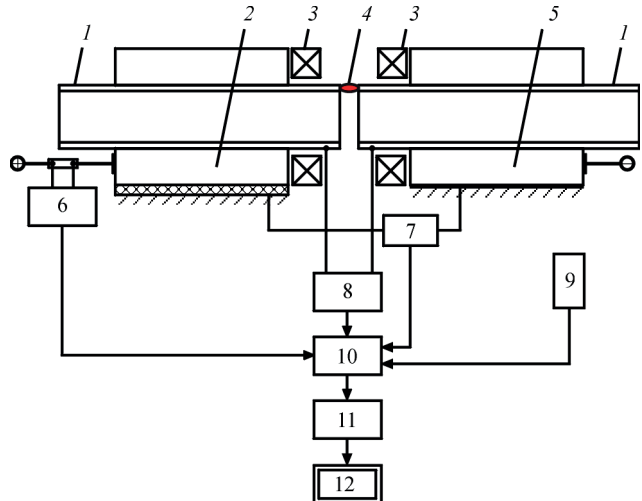


Рис. 3. Блок-схема макету оцінки якості зварюваних з'єднань: 1 – зварювані труби; 2 – рухомий затискний пристрій; 3 – елементи магнітної системи; 4 – стовп електричної дуги; 5 – нерухомий затискний пристрій; 6 – датчик струму; 7 – датчик положення; 8 – датчик падіння напруги на зварювальній дузі; 9 – датчик вимірювання абсолютного тиску гідравлічної системи; 10 – нормуючий інструментальний підсилювач (з ФНЧ $F_{зр} = 100$ Гц); 11 – приймаючий АЦП; 12 – промисловий комп'ютер

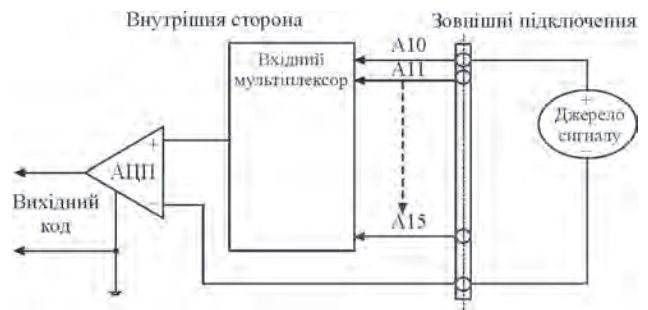


Рис. 4. Схема підключення датчиків системи реєстрації параметрів ПЗМД та структури АЦП

посередньо до клем, які розташовані на затискних пристроях зварювальної машини (за електричною схемою таке підключення відповідає підключенню до вихідних клем «+» та «-» джерела живлення зварювальної дуги). В підсилювачі, падіння напруги зварювальної дуги, яке виникає під час початку процесу і складає величину в межах 20...30 В постійного струму (в момент сталого руху дуги по кромкам деталей, що зварюють), нормується до вихідної напруги 2...3 В. Сигнал, відповідний вхідній напрузі, фільтрується до частоти зрізу АЧХ в 100 Гц, тим самим похідний сигнал напруги зварювальної дуги очищається від пульсацій та завад гармонік вищих порядків, але така частота фільтрації дозволяє зберегти динаміку відстеження зміни падіння зварювальної напруги та реєструвати незначні відхилення зварювальної напруги від заздалегідь встановленої. Для подальшої обробки та аналізу похідний сигнал падіння зварювальної напруги з виходу підсилювача 8 надсилається на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Під час роботи програмного забезпечення (старт програми оцінки якості), АЦП налаштовується таким чином, що частота опитування аналогових входів складає 10 точок опитування на одне читання даних з виходу АЦП. Таким чином досягається більш точне передавання даних до програми контролю. Цей принцип зображено на рис. 5.

Вибір такого типу пристрою зчитування даних протікання технологічного процесу обумовлено універсальністю та мобільністю отриманої системи реєстрації параметрів. Комплекс пристроїв збирання даних, побудований на пристроях з USB шиною передачі даних, не прив'язано до конкретного виконавчого устаткування та дозволяє оперативно та без втрат якості отримання даних, виконувати перебудову системи в разі виникнення необхідності розв'язання нових задач, поява яких неминуча при виконанні будь-якої дослідної роботи. Такий принцип побудови системи реєстрації даних дозволяє використовувати будь-який головний пристрій, як ПЕОМ класу «ноутбук» та індустріальні комп'ютери.

Визначено наступні параметри для встановлення частоти дискретизації аналогових входів:

U_{\min} – мінімальне значення падіння напруги на дугі, яке виникає внаслідок впливу різних чинників перебігу процесу нагрівання;

U_{\max} – максимальне значення при тих же вихідних умовах;

$U_{\text{вст.}}$ – технологічний параметр;

τ – затримка між тактами зчитування одного вхідного каналу АЦП;

$T_{\text{чт.л}}$ – загальна тривалість одного такту зчитування виходу АЦП (тривалість вибірки для фор-

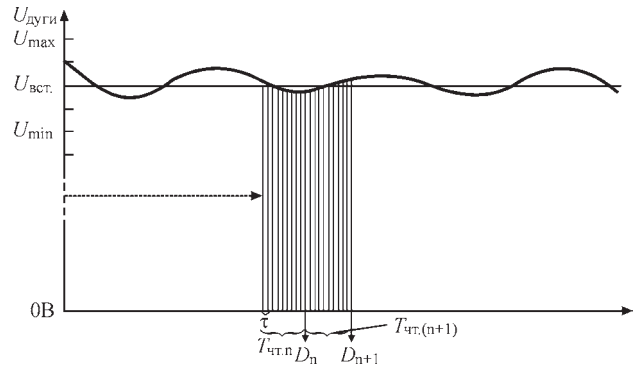


Рис. 5. Такти опитування одного входу АЦП та зчитування даних до програмного забезпечення макету системи контролю якості

мування пакету даних, що надходять до програми аналізу параметрів);

$T_{\text{чт.}(n+1)}$ – наступний пакет, що зчитується з АЦП;

D_n – пакет даних, що зчитується з АЦП (складається з масиву точок опитування чотирьох каналів по n -разів (кількість точок усереднення).

Усереднення дозволяє уникнути явища явності паразитних ємностей в побудові схеми вхідного мультиплексора АЦП.

В процесі зварювання труб виконується накопичення та формування масиву даних з чотирьох каналів АЦП у оперативній пам'яті ПЕОМ. Це дозволяє спростити процедуру обробки та аналізу отриманих даних після виконання зварювання.

Доопрацювання програмного забезпечення управляючого комплексу проводилось по шляху оновлення параметрів функціонування існуючих програмних модулів, це дозволило розширити часові та параметричні межі роботи виконавчих пристроїв, виконувати більш точно налаштування технологічних параметрів зварювання, отримувати дані про виконання процесу.

У процесі виконання зварювання виконується сканування датчиків системи, обробка отриманих даних та формування файлів даних та зведеного файлу денного рапорту, у якому фіксуються наступні параметри:

– час зварювання по етапам нагрівання $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$;

– струм дуги по етапам нагрівання I_2, I_3, I_4, I_5 (I_1 – струм початкового етапу процесу нагрівання під час аналізу не враховується завдяки його малому впливу на процес зварювання);

– напруга зварювальної дуги на трьох етапах нагрівання деталей U_2, U_3, U_4 (U_1 – напруга етапу збудження не враховується);

– загальна кількість витраченої на нагрівання деталей енергії E_a ;

– швидкість осадки $V_{\text{ос}}$ (експериментально встановлено, що це середня швидкість зустрічного руху на перших 1,5 мм дугового зазору перед контактом зварюваних труб);

– величина осадки S_{oc} (величина спільної деформації L деталей під час виконання осаджування, для кожної з деталей складає):

$$L = \frac{S_{oc}}{2} - l_{дп}, \quad (1)$$

де $l_{дп}$ – величина дугового проміжку між деталями перед початком виконання осаджування; тиск осадки P_{oc} ; температура масла гідравлічної системи та навколишнього середовища.

За даними рапортів формується база даних коливань значень цих параметрів при виконанні зварювання за весь період експлуатації устаткування, яка в подальшому буде використовуватися для оптимізації технологічного процесу.

Відхилення цих параметрів за межі допусків залежить від багатьох причин, у зв'язку з цим були розроблені алгоритми:

- керування для дворівневої системи, які забезпечують коригування режиму зварювання з метою стабілізації процесу;
- оцінки якості зварного стику;
- оцінки технічного стану зварювальної машини;
- формування рекомендацій з коригування параметрів технологічного процесу.

Існуючий контроль якості, при якому порівнюють отримані дані з еталонними, є найпростішою логічною функцією – показники якості перебувають у допуску при одночасному знаходженні в допуску всіх контрольованих параметрів. Однак при такому контролі не враховується:

- значимість впливу кожного з параметрів на показник якості;
- невизначеність межі допусків параметрів процесу;
- можливе посилення впливу на якість зварювання сукупності певної комбінації відхилень.

Розроблено та апробовано алгоритм контролю якості зварювання на основі аналізу параметрів процесу на трьох етапах його здійснення:

- 1 – збудження зварювальної дуги та нагрівання труб. Період формування температурного поля на торцях труб;
- 2 – підвищення зварювального струму;
- 3 – осадка та формування з'єднань.

Висновок про якість отриманого зварного з'єднання з певним ступенем імовірності (істинності) здійснюється на підставі логічних правил, які складені за результатами досліджень технологічних особливостей процесу зварювання труб [7].

Для контролю процесу зварювання використовуються наступні параметри:

- час (тривалість) зварювання по етапам (T_1-T_6);
- величина струму на етапах нагрівання (I_2-I_5);

– значення напруги на етапах існування дуги (U_2-U_4);

- швидкості та величини осадки (V_{oc} та L_{oc});
- тиск в гідравлічній системі під час осадки P_{oc} ;
- енергія, що витрачена на нагрівання деталей E_a .

Для виконання найпростішого способу контролю в систему оцінки якості отримуваних зварних з'єднань можна ввести наступне правило:

ЯКЩО деякий технологічний параметр X – визначено у полі допуску, ТО – отримане з'єднання відповідає вимогам якості за даним параметром.

Відповідно до вищевказаного отримуємо наступну послідовність для визначення якості отриманого з'єднання:

ЯКЩО встановлені проміжки часу технологічного процесу T_{1-6} у допуску ТА отриманий струм дуги I_{1-4} ТА виміряні напруги U_{2-4} у допуску ТА швидкість осадки V_{oc} у допуску ТА величина осадки L_{oc} у допуску ТА на етапі осадки відсутнє сковзання труб відносно затискних пристроїв, ТО зварний стик якісний.

Якщо виявлено відхилення встановлених проміжків часу технологічного процесу T_{1-6} АБО отриманий струм дуги I_{1-4} АБО виміряні напруги U_{2-4} не в межах встановлених допусків АБО швидкість осадки V_{oc} нижча від нижньої межі допуску АБО величина осадки L_{oc} менша від встановленої у допуску АБО на етапі осадки має місце поздовжнє сковзання деталей відносно затискних пристроїв, ТО зварене з'єднання визначається як неякісне.

У випадку реєстрації даних параметрів процесу з використанням комп'ютерної системи управління маємо обчислювальний алгоритм для визначення якості зварного з'єднання.

$$Q = \left\{ (T_{1-6}) \& (I_{2-5}) \& (U_{2-4}) \& (V_{oc}) \& (L_{oc}) \& (P_{oc}) \& !(S_{ск}) \right. \\ \left. !(T_{1-6}) \parallel !(I_{2-5}) \parallel !(U_{2-4}) \parallel !(V_{oc}) \parallel !(L_{oc}) \parallel !(P_{oc}) \parallel (S_{ск}) \right\} \quad (2)$$

де Q – логічна відповідність, яка може приймати значення «true» або «false» (відповідно «true» – якість отриманого з'єднання відповідає нормативам, «false» –якість отриманого з'єднання не відповідає нормативам); T_{1-6} – отримані під час перебігу технологічного процесу значення тривалості етапів зварювання; I_{1-4} – виміряні значення зварювального струму по етапам нагрівання деталей; U_{2-4} – напруга зварювальної дуги по етапам нагрівання; V_{oc} – початкова швидкість осадки; L_{oc} – величина виконаної осадки; $S_{ск}$ – ознака наявності поздовжнього сковзання деталей відносно пристроїв утримання зварювальної машини; ! – знак, який відповідає значення змінної «не відповідає встановленому допуску»; & – відповідає умові «ТА»; || – відповідає умові «АБО».

Програмну реалізацію вищенаведеного алгоритму (2) наведено на рис. 6.



Рис. 6. Алгоритм контролю якості зварюваних з'єднань

Висновки

1. Визначено вихідні вимоги до системи контролю основних технологічних параметрів ПЗМД зварювання.
2. Визначено межі змін основних технологічних параметрів при зварюванні для отримання якісних з'єднань.
3. Розроблено програмне забезпечення для реалізації алгоритму керування процесом зварювання та контролю якості з'єднань.

SYSTEM OF CONTROL, REGISTRATION OF PARAMETERS AND CONTROL IN THE PROCESS OF PRESS WELDING OF PIPES USING MAGNETICALLY-IMPELLED ARC

M.P. Koval, S.I. Kuchuk-Yatsenko, V.S. Kachynsky

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The technical requirements to the basic elements of the control system are determined. The structural design of the control system is described. The influence of the process parameters of press welding using magnetically-impelled arc on the quality of the produced joints is investigated. The limits of fluctuations of values of the parameters and their influence on quality of the produced joint are determined. The software of the system for evaluation of quality of welded joints is developed. 7 Ref., 6 Fig.

Keywords: welding technology, press welding using magnetically-impelled arc, control system, registration of parameters, system for quality evaluation of produced joints, joints formation

Надійшла до редакції
14.05.2020

4. Розроблено промислову технологію ПЗМД зварювання труб.

Список літератури

1. Руденко П.М., Гавриш В.С. (2007) Система автоматического управления и контроля процесса контактной точечной сварки КСУ КС 02. *Автоматическая сварка*, **11** (655), 43–45.
2. С.И. Кучук-Яценко, П.М. Руденко, В.С. Гавриш и др. (2016) Двухуровневая система управления. *Там же*, **5-6** (753), 17–20.
3. Кучук-Яценко С.И. (2018) Технологии и оборудование контактной сварки рельсов: 60 лет непрерывных инноваций. *Там же*, **11-12**, 29–46.
4. Руденко П.М., Гавриш В.С., Кучук-Яценко С.И. и др. (2017) Влияние параметров процесса стыковой контактной сварки оплавлением на прочностные характеристики стыков железнодорожных рельсов. *Там же*, **5-6**, 87–90.
5. Кучук-Яценко С.И., Качинський В.С., Коваль М.П. (2012) *Спосіб пресового зварювання*. Україна Пат. № 100278.
6. Кучук-Яценко С.И., Качинський В.С., Галахов М.В., Клименко В.И., Коваль М.П. (2019) *Машина для пресового зварювання труб та трубних закінчень, що нагріваються дугою, керованою магнітним полем*. Україна Пат. на корисну модель № 136339.
7. Качинський В.С., Кучук-Яценко С.И., Коваль М.П. (2020) Пресове зварювання магнітокерованою дугою високоміцних сталевих трубчастих деталей гідроциліндрів. *Автоматичне зварювання*, **1**, 45–51.

References

1. Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. (2007) KSU KS 02 system for automatic control and monitoring of resistance spot welding process. *The Paton Welding J.*, **11**, 43–45.
2. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Rudenko, P.M., Gavrish, V.S. et al. (2016) Statistical control of process of flash-butt welding of rails. Two-level control system. *Ibid*, **5-6**, 17–20.
3. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2018) Technologies and equipment for flash-butt welding of rails: 60 years of continuous innovations. *Ibid*, **11-12**, 29–46.
4. Rudenko, P.M., Gavrish, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I. et al. (2017) Influence of flash-butt welding process parameters on strength characteristics of railway rail butts. *Ibid*, **5-6**, 75-78.
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kachynskyi, V.S., Koval, M.P. (2012) *Method of press welding*. Ukraine Pat. 100278 [in Ukrainian].
6. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kachynskyi, V.S., Galakhov, M.V., Klymenko, V.I., Koval, M.P. (2019) *Machine for press welding of pipes and pipe ends heated by magnetically impelled arc*. Ukraine Pat. on utility model, 136339 [in Ukrainian].
7. Kachynskyi, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Koval, M.P. (2020) Press magnetically-impelled arc welding of high-strength steel tubular parts of hydraulic cylinders. *The Paton Welding J.*, **1**, 45–51.