

АНАЛІЗ СИСТЕМ СТЕЖЕННЯ, В ЯКИХ ДАТЧИКОМ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ Є СКАНУЮЧА ЗВАРЮВАЛЬНА ДУГА (Огляд)

С.В. Ткаченко, Т.Г. Самойлова, В.А. Ткаченко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: patonmed@gmail.com

В дугових зварювальних технологіях широко використовуються зварювальні автомати та роботи, які потребують застосування слідкуючих систем для орієнтації електроду відносно виробу. Актуальним є питання систематизації й аналізу різноманітних слідкуючих систем, описання їх особливостей і переваг. Слідкуючі системи, які використовуються в зварювальних автоматах, застосовують різні сигнали зворотного зв'язку, але найточнішими є сигнали, які знімаються безпосередньо зі зварювальної дуги, коли дуга використовується як датчик вимірювальної системи. Саме для таких систем розглянуті основні принципи одержання сигналів зворотного зв'язку при дуговому зварюванні та здійснено їх аналіз. Бібліогр. 11, рис. 15.

Ключові слова: дугове зварювання, зварювальна дуга, скануюча дуга, сенсор наведення, система стеження

Вступ. Системи стеження, які застосовуються у зварюванні, бувають різної точності, складності, ефективності, універсальності, але є одна, найбільш перспективна, категорія систем, в якій датчиком зворотного зв'язку є скануюча дуга.

В даній статті, яка ґрунтується в більшій частині на розробках ІЕЗ ім. Є.О. Патона, в тому числі і власних розробок авторів, накопичених ними матеріалів та наукових публікацій, наведені та проаналізовані особливості систем стеження з використанням скануючої дуги.

Робота призначена для спеціалістів по розробці зварювального устаткування.

Отримання якісного зварного з'єднання при дуговому зварюванні зумовлене одночасним вирішенням комплексу умов. Одною з основних умов є наведення зварювальної дуги на лінію сполучення зварюваних деталей в процесі проведення зварювання.

Задача наведення зварювальної дуги на лінію сполучення зварювальних деталей в процесі зварювання, може бути вирішена декількома способами [1].

Один із способів – точне позиціонування виробу та зварювального інструменту під час зварювання [2]. Другий спосіб – використання різних систем наведення зварювальної дуги на лінію сполучення деталей, які діляться на три основні групи:

- системи з механічним копіюванням лінії сполучення деталей, що зварюються;
- системи з використанням зовнішніх сенсорів наведення пальника на зварюваний стик;
- системи, що базуються на аналізі параметрів дуги.

Кожен із перерахованих способів має свої переваги та недоліки.

Розглянемо переваги та недоліки систем стеження з різними принципами дії.

Системи стеження з механічним копіюванням.

Механічне копіювання лінії сполучення деталей досить дешеве рішення задачі наведення електроду на стик, що зварюється, але вимагає наявності поверхонь копіювання, які повинні повторювати конфігурацію лінії сполучення деталей [3]. Цей спосіб вимагає спеціальних механізмів копіювання, не має достатньої точності, а також при його застосуванні можуть виявлятися негативні ефекти, пов'язані з:

- транспортним запізненням;
- недостатньою жорсткістю копіювального механізму та виробу;
- наявністю люфтів у копіювальному механізмі та інше.

Системи стеження з використанням зовнішніх сенсорів.

Системи наведення дуги на лінію сполучення зварювальних деталей, які отримують зворотний зв'язок по положенню стика щодо електроду від зовнішніх сенсорів, дозволяють створювати високоточні, гнучкі, універсальні системи наведення. Залежно від типів застосованих сенсорів, системи наведення поділяються на основні групи, на кшталт використовуваних сенсорів:

- тактильні;
- оптичні;
- індукційні;
- комбіновані та інші.

Системи, в яких використовуються зовнішні сенсори, широко поширені в автоматичних лініях і установках. Недоліком цих систем є необхідність розташування сенсорів поза зоною термічної,

світлової та електромагнітної дії зварювальної дуги, що породжує проблему транспортного запізнення, коли сенсор розташований перед зварювальною дугою, або необхідність в наявності поверхонь копіювання, які повторюють лінію сполучення зварювальних деталей.

Також можливе неконтрольоване відхилення зварювальної дуги від стику за рахунок впливу електромагнітних полів у зоні зварювання, наприклад – магнітне дуття, чи неконтрольоване відхилення зварювального дроту на вильоті з наконечника пальника та інші.

Системи стеження, що базуються на аналізі параметрів дуги.

Вимірюючи параметри зварювальної дуги, можна отримати сигнали зворотного зв'язку по положенню стику щодо зварювальної дуги безпосередньо в точці дотику дуги до зварювального виробу [4].

Інформаційними параметрами, що знімаються зі зварювальної дуги, можуть бути:

- напруга на дузі;
- струм зварювання;
- яскравість сийва дуги.

Аналізуючи величини та характер зміни цих параметрів, можливе отримання достовірної інформації про положення стовпа дуги відносно лінії сполучення деталей під час процесу зварювання безпосередньо у точці зварювання, що забезпечує відсутність помилок позиціонування, зумовлених:

- ефектом транспортного запізнення;
- відхиленням крайки за рахунок теплових деформацій;
- неконтрольованим відхиленням стовпа дуги електромагнітними силами, рухами повітря;
- відхиленням кінця зварювального дроту на вильоті при неточній правці дроту;
- зносом направляючих елементів зварювального інструменту (знос наконечників) та інше.

Системи стеження, що базуються на аналізі даних, отриманих безпосередньо зі зварювальної дуги є, на даний момент, найбільш універсальними, точними і перспективними, хоча можуть вимагати застосування спеціальних технологій зварювання.

Вплив похибок наведення дуги на зварювальний стик.

Якісне зварне з'єднання, отримане при дуговою зварюванні з застосуванням систем стеження, може бути отримане при точному наведенні зварювальної дуги на лінію сполучення зварюваних деталей, тобто сумарна загальна похибка наведення дуги на стик $P_{\text{заг}}$ дорівнює сумі похибок усіх збудовуючих факторів і повинна бути меншою за допустиму похибку $P_{\text{доп}}$:

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{с}} + P_{\text{тз}} + P_{\text{тд}} + P_{\text{см}} + P_{\text{в}} + P_{\text{з}},$$

де $P_{\text{с}}$ – похибка системи стеження; $P_{\text{тз}}$ – похибка викликана транспортним запізненням; $P_{\text{тд}}$ – похибка викликана відхиленням стику за рахунок теплових деформацій; $P_{\text{см}}$ – похибка викликана відхиленням стовпа дуги електромагнітними силами; $P_{\text{в}}$ – похибка, викликана відхиленням кінця електрода на вильоті; $P_{\text{з}}$ – похибка викликана зносом наконечника пальника.

Останні чотири похибки ($P_{\text{тд}} + P_{\text{см}} + P_{\text{в}} + P_{\text{з}}$), мають спонтанний характер, а їх компенсація дуже складна і малоімовірна.

При застосуванні системи стеження у якій, як сенсор зворотного зв'язку використовується зварювальна дуга, похибки наведення дуги на стик, що зварюється, істотно менші ніж у систем, які застосовують інші принципи отримання зворотного зв'язку, так як сума похибок ($P_{\text{тз}} + P_{\text{тд}} + P_{\text{см}} + P_{\text{в}} + P_{\text{з}}$) нівелюється.

Оскільки найперспективніші є системи наведення дуги на стик з використанням інформації про параметри самої дуги, доцільно розглянути принцип дії саме цих систем.

Принцип дії дугових слідкуючих систем.

Аналіз параметрів стабільної нерухомої дуги не дає можливості отримання достатньої інформації про її положення щодо зварюваного стику. Наприклад, напруга на дузі при ТІГ зварюванні нерухомою дугою може дати інформацію тільки про довжину дуги [5].

Для отримання необхідної інформації про положення дуги відносно стику необхідно забезпечити сканування зварювальною дугою зони сполучення зварюваних деталей. За наявності умов, які визначають положення стику – механічні, теплові або фізико-хімічні фактори та наявність сенсорів, які реагують на ці фактори, з'являються умови отримання інформації достатньої для створення системи стеження [6].

Фактори, що визначають положення стику, можуть бути різними, наприклад:

1. Механічні фактори, пов'язані з геометрією зони сполучення деталей:

- 1.1. Сполучення з зазором та без нього;
- 1.2. Сполучення з обробкою країв;
- 1.3. З'єднання в напуск та інше.

2. Фізико-хімічні фактори. Наявність у зоні зварювання хімічно активних елементів, що впливають на параметри дуги:

- 2.1 Нанесення активного флюсу, в зону стику;
- 2.2. Наявність різноманітних матеріалів в зоні зварювання;
- 2.3 Наявність вставки зі спеціального матеріалу та інше.

3. Також можуть використовуватись теплові фактори, наприклад:

- 3.1. Лазерний прогрів стику;

3.2. Наявність аномального теплового поля в зоні зварювання, обумовленого впливом адіабатичної межі між деталями що зварюються та інше.

Залежно від особливостей технології зварювання, а також умов, що визначають положення стику, вибирається вид сканування дугою зони сполучення деталей, які зварюються.

У зв'язку з тим, що зварювальна дуга має відносно невеликі розміри для сканування дугою зони сполучення, використовуються два варіанти створення пошукового руху.

Перший варіант – керування положенням та формою стовпа дуги за допомогою зовнішнього електромагнітного поля або потоку газу.

Другий варіант – здійснення сканування зони стику керованим переміщенням кінця електрода за допомогою механічних пристроїв, що приводяться в рух різними пристроями: електродвигуном, електромагнітом, струменем газу, тощо.

Пристрої, які сканують зону сполучення деталей, що зварюються, можуть забезпечувати різні види пошукових рухів кінця електрода, або дуги:

- лінійні – коливання поперек стику;
- кругові – кругове обертання, при якому стик перетинає лінію кола сканування;
- рухи, що мають складну траєкторію.

Сканування може бути постійним або періодично-пошуковим, з постійною або змінною амплітудою та швидкістю.

Види пошукового руху при скануванні вибираються в залежності від технології зварювання, конструкції пристрою сканування і оптимально необхідної складності пристроїв обробки сигналів, що надходять в якості зворотного зв'язку з апарата.

Сканування стовпом дуги.

Розглянемо декілька варіантів систем стеження, заснованих на використанні інформації, отриманої при скануванні стовпом дуги зони сполучення деталей, що зварюються.

Необхідність керування стовпом дуги обумовлена необхідністю отримання інформації про положення електрода щодо стику, мінімізацією непередбачуваної поведінки стовпа дуги під час зварювання (наприклад, перекидання дуги на одну крайку), а також створення умов жорсткого керування дугою, її фіксації в необхідних положеннях.

Для отримання інформації про положення електрода відносно зварювального стику, необхідно зіставляти фазу скануючого руху стовпа дуги з вимірюваними в цих фазах параметрами дуги [6].

При поперечному скануванні стику в процесі зварювання може змінюватись довжина стовпа дуги, як наслідок і напруга на дузі. Аналізуючи величину напруги на дузі в різних фазах сканування, можна отримувати інформацію про положення кінця електрода щодо лінії стику деталей та корегувати положення електрода відносно лінії сполучення деталей. При такому процесі зварювання гарантовано проплавлення обох зварюваних деталей, тому що дуга примусово перекидається з однієї крайки на іншу. Час, який дуга стоїть на кожній крайці, можна задавати за допомогою систем керування магнітним полем. Ці унікальні можливості керування стовпом дуги дозволяють запобігти виникненню підрізів та напливів зварного шву, оскільки крайки можна гріти з різною інтенсивністю.

Такі слідкуючі системи можуть бути використані для зварювання різних видів з'єднань [2], деякі з них показані на рис. 1.

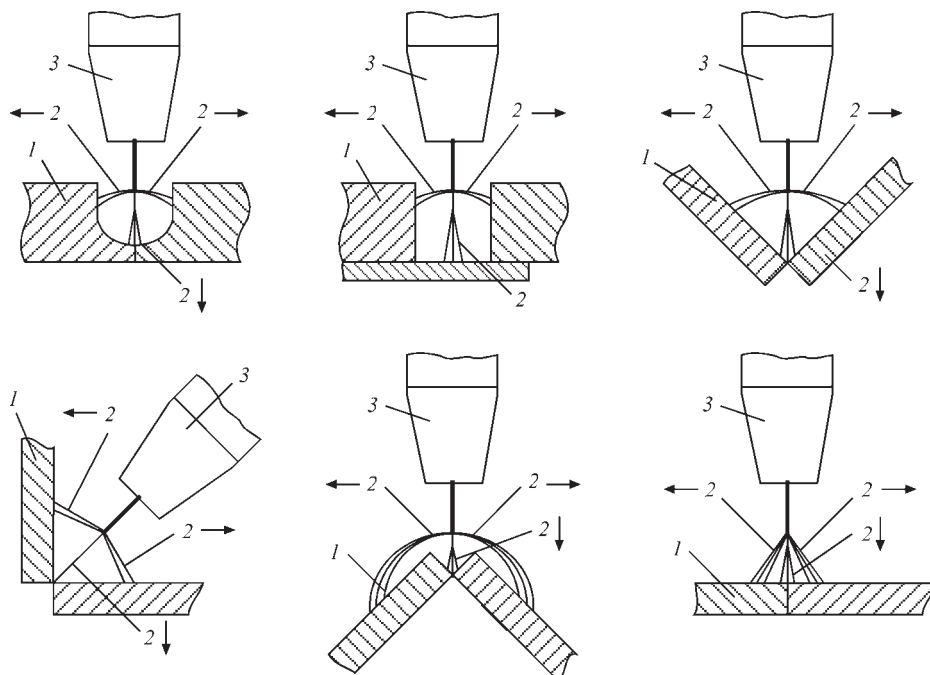


Рис. 1. Різні види з'єднання: 1 – зварювальні деталі; ←2 – скануюча дуга в фазі «відхилення вліво»; ↓2 – скануюча дуга в фазі «без відхилення»; →2 – скануюча дуга в фазі «відхилення вправо»; 3 – пальник з електродом

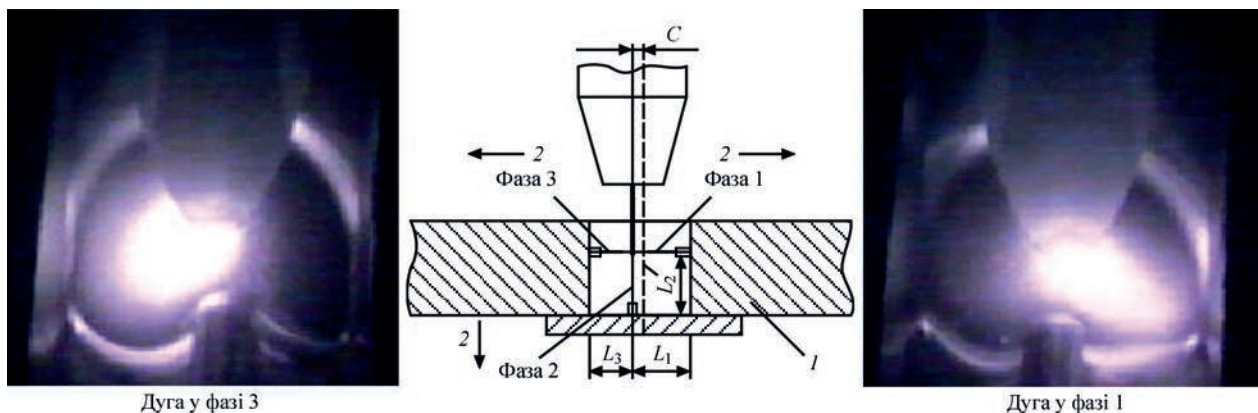


Рис. 2. Положення стовпа дуги при скануванні зовнішнім магнітним полем: 1 – зварювальні деталі; →2 – скануюча дуга в фазі 1 «відхилення вправо»; ↓2 – скануюча дуга в фазі 2 «без відхилення»; ←2 – скануюча дуга в фазі 3 «відхилення вліво»; 3 – пальник з вольфрамовим електродом; L_1, L_2, L_3 – довжини стовпа дуги в різних фазах сканування

Слід зазначити, що використовуючи систему стеження з керованим стовпом дуги за допомогою зовнішнього магнітного поля, при ТІГ зварюванні, можна створювати зварювальні апарати з автоматичним наведенням електрода на зварюваний стик для великої кількості видів стиків, що мають розміри зони стеження менші за довжину стовпа дуги. Для прикладу розглянемо зміну параметрів зварювальної дуги при ТІГ зварюванні в щільне розкриття крайок із застосуванням системи стеження, заснованої на керуванні положенням стовпа дуги за допомогою зовнішнього керованого магнітного поля, яке забезпечує поперечне сканування зварного стику [5, 7].

На рис. 2 показано положення електрода та стовпа дуги при скануванні стику зварювальних деталей (поперечне сканування розкриття крайок). Електрод має відхилення від вісі розкриття крайок на величину $C = L_1 - L_3$.

Найбільш доцільно аналізувати параметри напруг стовпа дуги у трьох фазах (точках): фаза 1 – крайнє праве положення; фаза 2 – середнє положення; фаза 3 – крайнє лівє положення.

Ці положення фази показані на рис. 2.

Якщо $L_1 \neq L_3$, то і напруга $U_{\text{фаза 1}} \neq U_{\text{фаза 3}}$, а різниця між цими напругами дасть інформацію про відхилення кінця електрода від вісі розкриття крайок.

Напруга на дузі в фазах 1 і 3 визначається відстанню від кінця електрода до металу, що зварюється. Різниця напруг ΔU між фазами 1 і 3 дуги дорівнює:

$$\Delta U = U_{\text{фаза 1}} - U_{\text{фаза 3}} = (U_n + K_g \cdot L_1) - (U_n + K_g \cdot L_3) = K_g \cdot (L_1 - L_3) = K_g \cdot C,$$

де U_n – сума прианодної та прикатодної напруги; K_g – коефіцієнт перерахунку довжини дуги в падіння напруги на стовпі дуги; C – різниця довжин стовпів дуг, $C = L_1 - L_3$. З іншого боку $C = \Delta U / K_g$.

Отримана інформація про відхилення електрода щодо вісі стику дозволяє приймати рішення про корекцію електрода в горизонтальній площині.

Аналізуючи напругу, виміряну у фазі 2 ($U_{\text{фаза 2}} = U_n + K_g \cdot L_2$), можна визначити довжину дуги по висоті та коригувати електрод у вертикальній площині. Швидкість сканування повинна знаходитися в таких межах, щоб інформаційний сигнал про зміщення електрода був стабільний, без ефекту розмивання дуги.

Використовуючи результати виміру напруги дуги в трьох фазах, можливо створити двохкоординатну систему стеження за стиком (віссю розкриття крайок та довжиною дуги), яка буде утримувати електрод в необхідному положенні під час зварювання. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона була створена установка для зварювання листів титану (Ti) товщиною до 100 мм з використання системи сте-



Рис. 3. Макрошліф зварного з'єднання сплаву АТЗ завтовшки 110 мм ($I_{\text{зв}} = 420$ А, $U_{\text{д}} = 13$ В, $V = 8$ м/год)

ження, в якій був задіяний принцип керування стовпом дуги за допомогою магнітного поля [8, 9]. Установка успішно працювала на промислових підприємствах. Отримані за допомогою цієї установки результати були якісними, що видно на макрошліфах зварного з'єднання, (рис. 3) [7].

Для зварювання виробів з іншим типом розкриття крайок, технічний підхід до вирішення задачі стеження залишається таким самим, змінюються тільки техніка розрахунку величини відхилень. Як приклад, можна розглянути розрахунок величини відхилення при зварюванні в «човник».

На рис. 4 представлена схема зварювання в «човник», де відхилення розраховується за формулою:

$$C = (U_{B1} - U_{B2}) \cdot \sin 45^\circ \cdot K_g$$

Приведені розрахунки приблизні та спрощені, але вони дають загальну картину отримання сигналів для систем стеження. Подібні розрахунки можна проводити і для інших конфігурацій розкриття крайок.

Керування стовпом дуги (коливання, обертання, тощо) зовнішнім магнітним полем, що створюється електромагнітом, дозволяє задавати різноманітні закони відхилення стовпа дуги при високій динаміці цього процесу, так як дуга є мало-інерційним стовпом плазми.

Використовуючи можливості динамічного керування стовпом дуги, можна мінімізувати деякі дефекти, що виникають при дуговому зварюванні, наприклад прибирати підрізи, напливи та інше.

Експерименти з різними частотами керування положенням стовпа дуги в діапазоні від 0,5 до 100 Гц показали, що при частотах вище 30 Гц відбувається «розмивання» стовпа дуги по всій амплітуді коливань (обертань), а це може зашкодити в отриманні інформації про положення дуги.

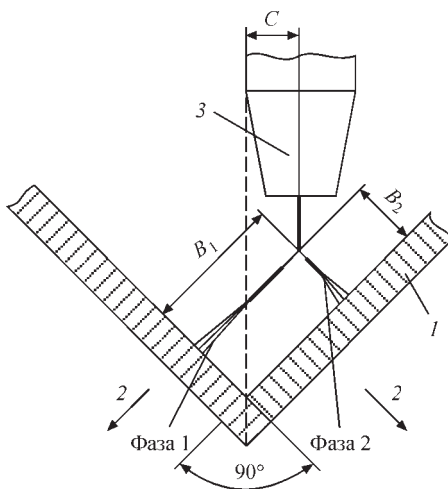


Рис. 4. Схема зварювання в «човник»: 1 – зварювальні деталі; 2 – сканоюча дуга в фазі «відхилення вправо»; 2 – сканоюча дуга в фазі 1 «відхилення вліво»; 3 – пальник з вольфрамовим електродом; B_1 , B_2 – довжина стовпа дуги в різних фазах сканування; C – відхилення електроду від вісі розкриття крайок

При частотах нижче 10 Гц стовп дуги встигає стабілізуватися в кожній точці сканування, даючи можливість отримувати інформацію про параметри стовпа дуги в цій точці, що дозволяє отримувати достовірну інформацію про профіль розкриття крайок об'єкта, який сканується.

Маючи інформацію про форму розкриття крайок та положення кінця електроду щодо вісі розкриття, можна виготовляти інтелектуальні системи наведення електроду на стик і отримувати в результаті зварювання дуже якісні з'єднання, використовуючи технологію зварювання скануючою дугою. Ці системи доцільно застосовувати при зварюванні довгих прямолінійних та криволінійних швів при умові, що розмір зони сканування, яка потрібна для відслідковування, не перевершує 10 мм. При більшому розмірі розкриття треба використовувати інші системи стеження.

Розглянемо інший варіант сканування зони сполучення зварюваних деталей заснований на принципі переміщення кінця електроду за допомогою механічних пристроїв. В цьому варіанті механічний рух кінця електроду над розкриттям крайок переміщує зварювану дугу в зоні стику. Дуга змінює свої параметри в залежності від свого положення над стиком.

Сканування зони зварювання механічним переміщенням кінця електроду використовується у випадках, коли зварювання ведеться короткою дугою (наприклад, в CO_2), а зона сканування перевищує довжину стовпа дуги. Переміщення кінця електроду, при скануючих рухах, може здійснюватися механізмами руху на основі електродвигунів, електромагнітів або газовим струменем.

Сам рух кінця електроду може бути як коливальним – поперек зварюваного стику, так і обертальним над зоною стику зварювальних виробів. Амплітуда сканування може бути сталою або змінною, в залежності від вимог до технології зварювання конкретних конструкцій. При механічному переміщенні кінця електроду дуга буде переміщатися за електродом, скануючи зварювальний стик. При цьому відбувається зміна взаємного розташування кінця скануючого електроду і стику виробу, що приводить до зміни параметрів зварювальної дуги в різних фазах сканування. Аналіз параметрів дуги в різних точках сканування дозволяє сформувати команди корекції вісі пальника відносно вісі розкриття крайок та відслідковувати стик на всій довжині зварного шву.

В основному системи стеження з механічним скануванням використовуються в MAG зварюванні, в захисних газах CO_2 , Ar, або сумішах газів.

В технологіях MAG зварювання, використовуються джерела з достатньо жорсткою вольтамперною характеристикою, тому основним інфор-

маційним носієм сигналу зворотного зв'язку буде динаміка зміни зварювального струму, а довжина дуги і відповідно напруга на ній є допоміжною інформацією [4, 6, 10].

Розглянемо принцип отримання сигналу при поперечному скануванні зони сполучення зварювальних деталей рухливим кінцем електрода при використанні технології MAG зварювання.

Для прикладу розглянемо зварювання виробу з глибоким розкриттям крайок, представлене на рис. 5.

При механічному скануванні розкриття крайок, довжина дуги практично не змінюється ($L_{g1} \sim L_{g2} \sim L_{g3}$) [6]. Змінюється тільки виліт електрода, а так як це динамічний процес, то при наїзді на крайку буде

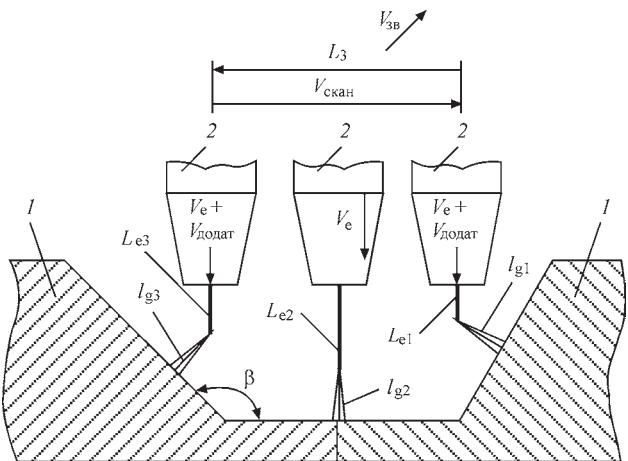


Рис. 5. Зварювання виробу з глибоким розкриттям крайок : 1 – зварювальні деталі; 2 – скануючий пальник; L_{e1} – виліт електрода у фазі 1; L_{g1} – дуга електрода у фазі 1; L_{e2} – виліт електрода у фазі 2; L_{g2} – дуга електрода у фазі 2; L_{e3} – виліт електрода у фазі 3; L_{g3} – дуга електрода у фазі 3

змінюватися відносна швидкість подавання електродного дроту. Це ілюструється рис. 6.

Швидкість плавлення дорівнює сумі швидкості подачі електрода і доданий швидкості:

$$V_{\text{плавлення}} = V_{\text{е подачі}} \pm \Delta V_{\text{додаток}}$$

З наведеної формули видно, що відносна швидкість подачі зварювального дроту, при наїзді на крайку, зростає на

$$\Delta V_{\text{додаток}} = V_{\text{скан}} \cdot \text{tg } \beta,$$

що приводить до зростання зварювального струму на

$$\Delta I = K_{\text{т}} \cdot \Delta V_{\text{додаток}}$$

де $K_{\text{т}}$ – коефіцієнт залежності струму від швидкості подачі зварювального дроту, а при протилежному русі електрода відносна швидкість подачі зварювального дроту зменшується, що приводить до зниження зварювального струму. При наїзді на крайку зварювальний струм зростає приблизно на 10...35 % від номіналу.

Зміна струму при наїзді та з'їзді з крайки виглядатиме приблизно так, як показано на рис. 6.

Для розрахунку необхідної швидкості скануючого переміщення пальника треба врахувати величину сплеску струму, який гарантовано виділить система стеження. Знаючи конфігурацію розкриття крайок, параметри струму та напруги, величину необхідного сплеску струму, можна розрахувати швидкість скануючого переміщення пальника. На практиці ця швидкість дорівнює 10...35 мм/с.

Аналізуючи характер зміни струму при скануванні розкриття крайок зварювальним електродом можна вирахувати розміри розкриття та його положення відносно вісі переміщення зварювального апарату.

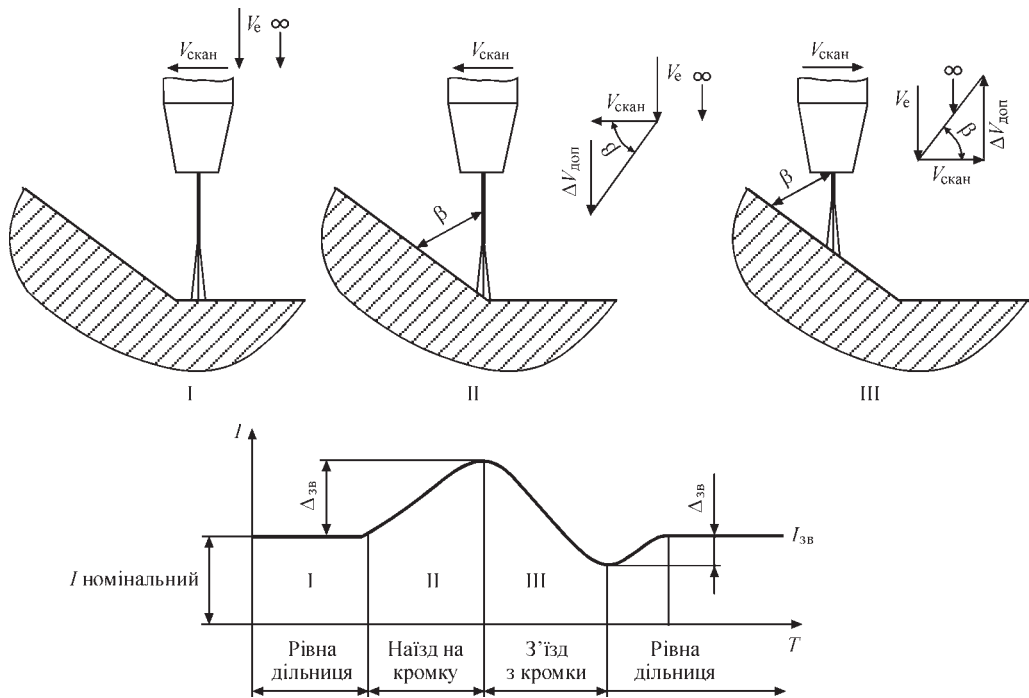


Рис. 6. Зміна відносної швидкості подавання електродного дроту

Значною перевагою цієї системи стеження може стати можливість оцінки ширини розкриття крайок під час зварювання. За умови, що скануючий рух електрода поперек розкриття відбувається від крайки до крайки, можна отримувати інформацію про амплітуду коливань пальника. Цю інформацію можна використовувати для корекції швидкості зварювання, що дозволить заповнювати розкриття на задану глибину при непостійній ширині розкриття по всій довжині зварного шва (рис. 7).

Наприклад, при зменшенні амплітуди коливання пальника для підтримування однакової глибини наплавлення $h' = h''$, необхідно збільшити швидкість зварювання на необхідну величину. Змінюючи швидкість $V_{зв}$ в залежності від ширини коливань пальника (ширини розкриття крайок), можливо заповнювати розкриття на необхідну висоту, а це дозволяє якісно зварювати деталі за допомогою багатопрхідної технології зварювання.

Ця система дає можливість зварювати деталі, які мають криволінійну лінію сполучення та розкриття крайок зі змінним перетином по довжині шва і навіть робити автоматичне багатопрхідне зварювання складного розкриття із нормованим заповненням. Закінчувати зварювання (класти останній шов – посилення) можна спираючись на інформацію, отриману при зварюванні попереднього проходу за допомогою системи запам'ятовування параметрів попереднього проходу та відтворення його з необхідною корекцією.

На рис. 7 показаний приклад заповнення змінним по ширині розкриття крайок за три проходи: I – широке розкриття; II – середнє розкриття; III – вузьке розкриття

направленням та шириною розкриття, а також показано перетин розкриття з різною шириною, чим ширше розкриття, тим повільніше повинна бути швидкість зварювання.

Така технологія зварювання була успішно реалізована спеціалістами ІЕЗ ім. Є.О. Патона при зварюванні довгих криволінійних швів з товстого прокату 20...50 мм, ширина розкриття крайок змінювалась від 10 до 50 мм, шов зварювався в три проходи. Перші два проходи давали заповнення розкриття по 10...20 мм, останній прохід проводився на базі інформації, яка попереднього запам'ятовувалась на другому проході.

Створення системи стеження на принципі поперечного механічного коливання пальника з можливістю забезпечення зміни зони коливання її ширини і положення по всій довжині шва, де пошуківі коливання та корекція здійснюються лише одним пристроєм – механізмом поперечного пересування пальника, вимагає застосування швидкодіючої схеми вимірювання параметрів дуги та високошвидкісного мало-інерційного механізму коливань. Ця система стеження дозволяє створити зварювальну апаратуру з можливостями адаптації при автоматичному зварюванні в умовах неможливості забезпечення рівномірної конфігурації розкриття крайок по довжині.

Сканування обертанням електрода.

Дуже перспективним для автоматизації зварювання швів зі складною траєкторією розкриття крайок є система стеження з круговим скануючим рухом електрода. У цій системі електрод переміщується по колу над віссю розкриття. Знімаючи

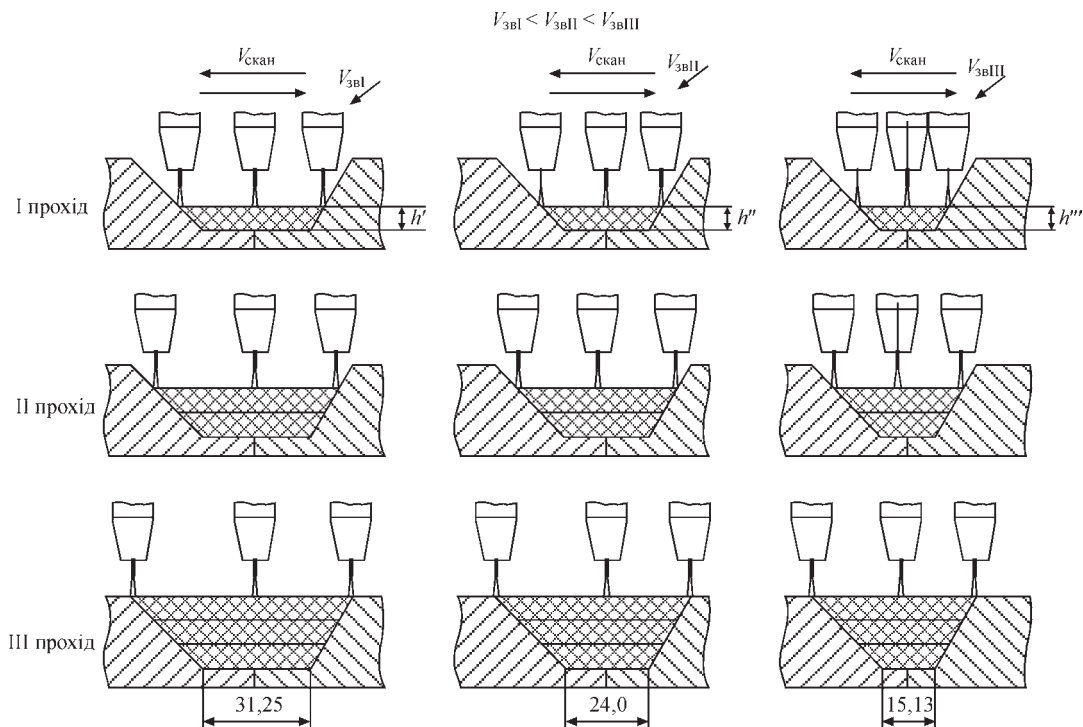


Рис. 7. Зварювання змінного по ширині розкриття крайок за три проходи: I – широке розкриття; II – середнє розкриття; III – вузьке розкриття

інформацію про параметри зварювальної дуги та фазу положення кінця електрода, система стеження утримує центр обертання електрода на вісі розкриття крайок. Це дозволяє відстежувати та заварювати криволінійні шви складної траєкторії.

Розглянемо принцип одержання інформації для цієї системи стеження за розкриттям крайок, спираючись на рис. 8.

На рис. 8 зображено фази руху пальника. Аналізуючи інформацію, одержану при обробці сигналів, що виникають у процесі сканування розкриття крайок в точках А, Б, С, Д і знаючи координати точок відліку обертання електрода (1, 2, 3, 4), можна створити систему наведення вісі

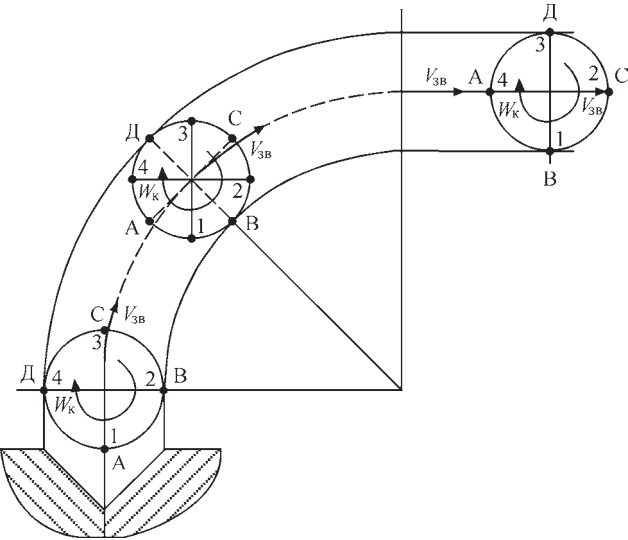


Рис. 8. Система стеження з круговим скануючим рухом електрода: W_k – швидкість кутового скануючого руху кінця зварювального дроту; V_{zv} – швидкість, у напрямку зварювання; 1, 2, 3, 4 – координати відліку кутового скануючого руху електрода; А, Б, С, Д – характерні точки, в яких з’являються сигнали, що обумовлюють розташування розкриття крайок при круговому скануючому переміщенню кінця зварювального дроту відносно розкриття крайок

обертання електрода на вісь розкриття крайок під час зварювання криволінійних швів.

Технологічні особливості дугового зварювання із застосуванням сканування зварюваного стику дугою.

Скануючий рух дуги призводить до перемішування та коливання розплавленого металу в зварювальній ванні [8–10]. Це позитивно позначається на якості шва, що формується. Структура металу шва стає більш рівномірною за перерізом та більш дрібнокристалічною, що можна побачити аналізуючи макрошліфи на рис. 9.

Зварювальна дуга в цьому процесі є зовні керованим елементом, що дає можливість налаштування скануючих рухів, так щоб дуга гарантовано проплавляла обидві крайки стику для забезпечення надійного їх сплавлення між собою. Процес сканування дугою дозволяє мінімізувати ефект магнітного дуття, ефект інтенсивного плавлення, більш нагрітої крайки до якої тягнеться стовп дуги і найголовніше – дозволяє точно відстежувати положення розкриття крайок в процесі зварювання. Приклад сплавлення двох крайок в процесі зварювання зі скануючою дугою показано на рис. 10 [9].

Керуючи швидкістю коливання електрода впоперек зварювального шва, а також маючи можливість уповільнення, прискорення, зупинки електрода в будь-якій точці сканування, з’являється можливість змінювати в широких межах форму накладеного шва. Як приклад, з’являється можливість усунення ефекту підрізу крайок шва при зварюванні деталей зі складними геометричними формами розкриття крайок.

Зварювання з використанням скануючих рухів зі змінними законами переміщення кінця зварювального дроту дозволяє імітувати рух пальника висококваліфікованого зварника, отримувати якісні з’єднання при автоматичному зварюванні.

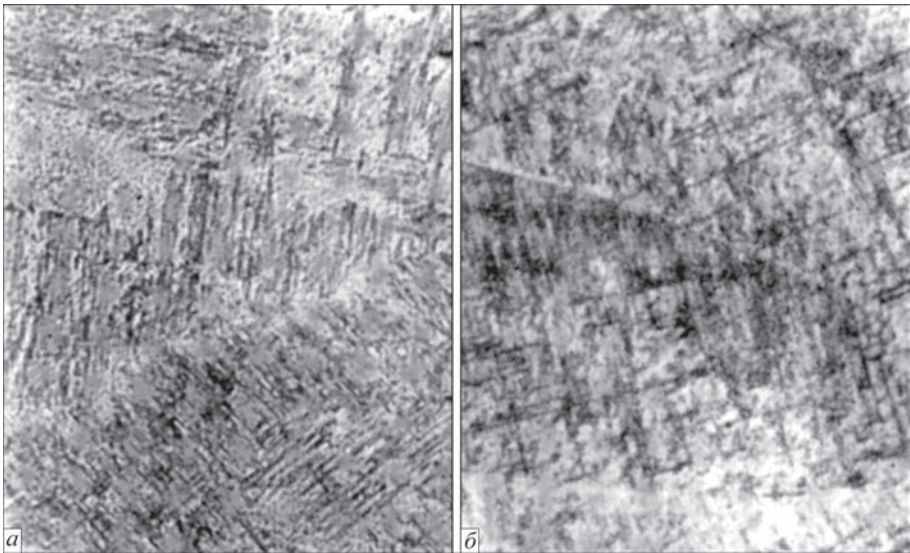


Рис. 9. Мікроструктура ($\times 400$, зменш. 2/3 шва, зробленого на сплаві ВТ1-00 ($I_{zv} = 420$ А, $U_d = 13$ В, $V = 8$ м/год): а – зварювання із застосуванням магнітного поля ($f_m = 30$ Гц); б – без магнітного поля

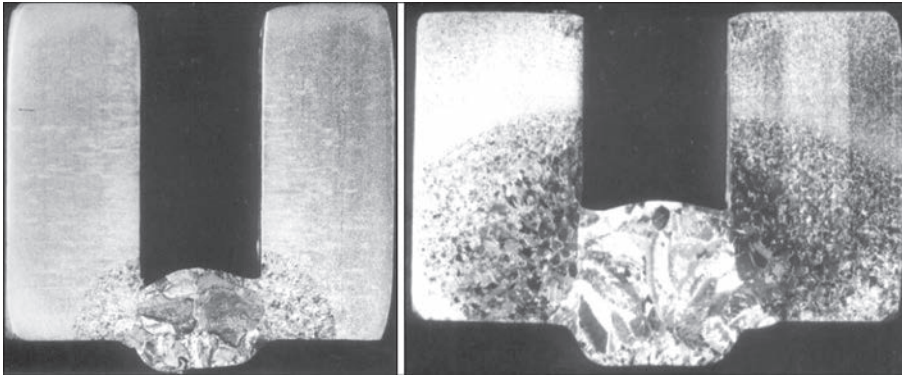


Рис. 10. Зварний шов. Режим зварювання: $I_{зв} = 460$ А, $V_{зв} = 5$ м/год, частота керування магнітним полем, $W = 4$ Гц, величина магнітної індукції в зоні зварювання $B = 7$ мТл

Оригінальні технології зварювання та наплавлення з використанням скануючої дуги.

Представляє великий інтерес перспективна технологія зварювання тонколистового металу без підкладки з можливими зазорами в місці стику листів, яка дозволяє реалізувати система стеження зі скануючою дугою.

Керована дуга під час зварювання гарантовано перекидається з однієї крайки на іншу і завжди плавить обидві крайки листа, що зварюються, тому листи сплавляються по всій довжині. При скануванні дугою можливо вимірювати ширину зазору між крайками, це дозволяє коригувати швидкість зварювання для формування якісного шва.

Варіанти MAG зварювання тонколистового металу показано на рис. 11.

У першому варіанті без сканування, дуга може «приклеїтись» до більш нагрітої крайки і плавити її, при цьому не утворюючи сплавлення з іншою крайкою, що призведе до виникнення наскрізного отвору. У другому варіанті зі скануванням, дуга плавить обидві крайки, при цьому отримуємо умови формування якісного шва.

Проведені експерименти показали можливість отримання якісного шва при зварюванні двох листів у стик без підкладки завтовшки 3 мм при зазорі між листами від 0 до 3 мм. Це зварювання виконувалося на установці, оснащений зварювальною головкою з системою стеження. Пальник був розрахований на MAG зварювання з плавким

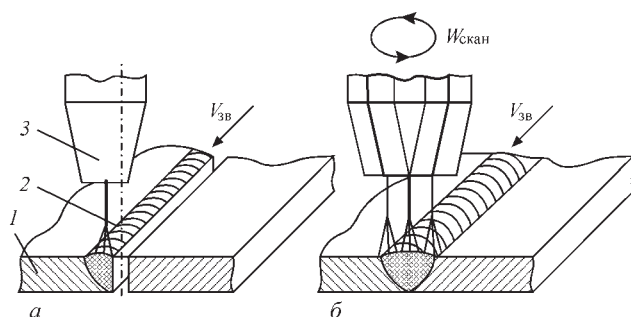


Рис. 11. MAG зварювання тонколистового металу: а – зварювання без скануючих рухів пальника (дуга перекинулася на одну із крайок і плавить тільки її в зоні стику); б – зварювання зі скануючими рухами пальника поперек стику або по колу

електродом (дріт діаметром 0,8...1,0 мм) і пошуковим рухом електрода, по колу діаметром 5 мм відносно вісі пальника.

Результати, одержані при зварюванні на цій установці показали, що система стеження зі скануючою дугою може зварювати тонкі листи металу з максимальним зазором рівним товщині металу, що зварюється без підкладки з хорошим формуванням зварного шва.

Нові технології зварювання можуть використовувати скануючу дугу для покращення якості зварного з'єднання та як основу системи стеження.

Одним із варіантів системи стеження скануючим стовпом дуги є зварювання вольфрамовим електродом у середовищі Ar або сумішах Ar + He. У цьому середовищі зварювальна дуга досить довга і еластична, відсутнє розбризкування крапель електродного металу. Сканування зони сполучення здійснюється переміщенням стовпа дуги перпендикулярно (поперек) стику або його обертання відносно стику під дією зовнішнього магнітного поля.

Нові можливості зварювання листів металу з системою стеження відкриває можливість використання інформації про положення стику відносно зварювальної дуги і зумовлено тепловими процесами в зварювальних деталях, та їх впливу на параметри дуги. Тобто зміна параметрів дуги в процесі поперечного сканування виникає за рахунок ефекту відбиття тепла від адіабатичної межі, що виникла на стику двох листів металу, що зварюються.

Якщо листи металу щільно притиснуті один до одного, все одно залишається зазор між ними, який і забезпечує ефект відбиття тепла. На рис. 12 показані фази поперечного сканування «беззазорного» стикового з'єднання та форму розплавленого металу в зоні стику під час його сканування [10].

Параметри дуги стрибкоподібно змінюються при заході стовпа дуги на зону стику пластин (переході з фази II у фазу III). Це викликано ефектом збільшення глибини проплавлення першої пластини, на якій горить дуга відбитим від адіабатичної межі теплом. Глибина проплавлення першої пластини збільшується майже вдвічі в районі стику.

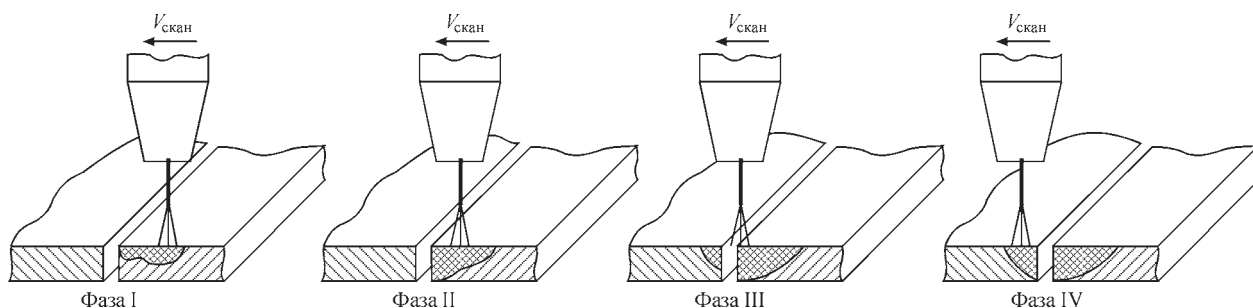


Рис. 12. Фази поперечного сканування «беззазорного» стикового з'єднання

Друга пластина залишається непрогрітою, поки на неї не перекинеться стовп дуги.

При перекиданні стовпа дуги на другу пластину відбувається зміна параметрів дуги. Зафіксувавши цю зміну та знаючи фазу руху стовпа дуги, можна отримати інформацію про положення стику щодо електрода та корегувати положення електрода відносно лінії стику деталей.

Оригінальні зварювальні технології дозволяють отримати нові ефекти при виділенні сигналу стеження для скануючої системи наведення електрода на стик при застосуванні активуючого флюсу, яким можна змастити торці листів металу, що зварюються в стик, при зварюванні без зазору. При проходженні дуги над місцем накладання флюсу параметри дуги змінюються, а це дає інформацію для отримання сигналу, який можна використовувати для корекції зварювальної головки.

Принцип дії механізмів, які забезпечують скануючий рух зварювальної дуги.

Одним з основних вузлів систем стеження, що використовують скануючу дугу, є вузол, який забезпечує скануючий рух стовпа дуги, чи кінця електрода.

Розглянемо механізми, що забезпечують пошуковий рух стовпа дуги під час дугового зварювання зі скануванням розкриття крайок.

Сканування стовпом дуги, керованого магнітним полем.

Відхилення стовпа дуги можливе зовнішнім магнітним полем, газовим струменем та ін.

При впливі на зварювальну дугу магнітного поля стовп дуги підпорядковується законам взаємодії магнітного поля і провідника зі струмом, у якого зафіксований один кінець на торці електрода, а другий може вільно переміщуватись по зварювальній деталі.

Керуюче зовнішнє магнітне поле може бути створене електромагнітом чи постійним магнітом, або їхньої комбінацією.

Керуюче магнітне поле відхиляє стовп дуги, що дозволяє отримати інформацію в точках відхилення дуги. Аналізуючи параметри дуги, можна здійснювати корекцію пальника щодо розкриття крайок.

При необхідності можна створити складне магнітне поле, що керує стовпом дуги на основі набору електромагнітів, яке може забезпечити різні закони переміщення стовпа дуги (на-

приклад, круговий рух з зупинками в необхідних точках і т.п.)

Максимальна і мінімальна (тобто діапазон зміни) довжини стовпа зварювальної дуги при TIG зварюванні залежить від обраної технології, складу захисного газу, властивостей зварювального джерела, матеріалів електрода і форми розкриття крайок. При TIG зварюванні в середовищі Ar і сумішах, довжина дуги може змінюватись від 2...10 мм та більше.

Одним з основних переваг способу магнітного керування положенням стовпа дуги, є відсутність рухливих частин і механізмів. Положення стовпа дуги визначається:

- величиною струму дуги;
- величиною магнітного поля, що впливає на стовп дуги;
- конфігурацією виробу поблизу зварювального електрода (формою розкриття крайок);
- місцем знаходження кінця електрода, щодо зварювальної деталі.

Знаючи основні параметри дуги та електромагніту, який впливає на стовп дуги, можна створити надійну та гнучку систему керування положенням стовпа дуги, що забезпечить коливальні або обертальні рухи стовпа дуги. Для керування електромагнітами можна використовувати мікропроцесорну схему з силовими ключами на виході [9, 11].

Сканування за рахунок механічного переміщення кінця електрода.

Ще одним способом забезпечення скануючих рухів дуги є кероване переміщення кінця електрода відносно зварювальної деталі.

Для прикладу розглянемо декілька механізмів, які забезпечують кероване переміщення кінця електрода.

Простий та надійний механізм коливання (обертання) кінця електрода є механізми із застосуванням керованого магнітного поля, що впливає на провідник зі струмом. Принцип дії механізму при TIG зварюванні показано на рис. 13.

Магнітне поле, яке проходить перпендикулярно електроду, відхиляє вольфрамовий електрод довжиною до 150 мм, нагрітий зварювальним струмом, що проходить крізь нього. Величина відхилення кінця електрода залежить від струму,

який проходить через електрод, сили магнітного поля і гнучкості нагрітого електрода, довжини електрода та іншими факторами.

При MAG зварюванні використовується схожий принцип створення відхилення кінця електрода, тільки тут у якості провідника зі струмом використовується гнучкий направляючий канал, по якому проходить зварювальний струм та зварювальний дріт, рис. 14. Ці механізми надійні та прості, бо не мають поверхонь тертя та електродвигунів.

Більш складні механізми для скануючого переміщення кінця електрода, можуть бути збудованими на основні механізмів, оснащеними електродвигунами.

Для багатопрорізного зварювання в розкриття крайок завширшки більше 5...10 мм застосовуються коливачі, виготовлені на основі керованих реверсних механізмів, оснащених електродвигунами. Один з варіантів зображено на рис. 15. Переміщення електрода поперек розкриття крайок забезпечується механізмом лінійного переміщення, в якому швидкість та напрям руху пальника задає електродвигун, найчастіше шаговий. В процесі зварювання зі скануванням, пальник здійснює коливальні рухи від однієї крайки до іншої.

Цей механізм може мати досить великий хід, щоб виконувати одночасно дві функції: коректора вісі колювання пальника щодо вісі розкриття крайок, тобто виконувати функцію стеження за напрямом; вимірювання ширини розкриття крайок. Якщо переміщення

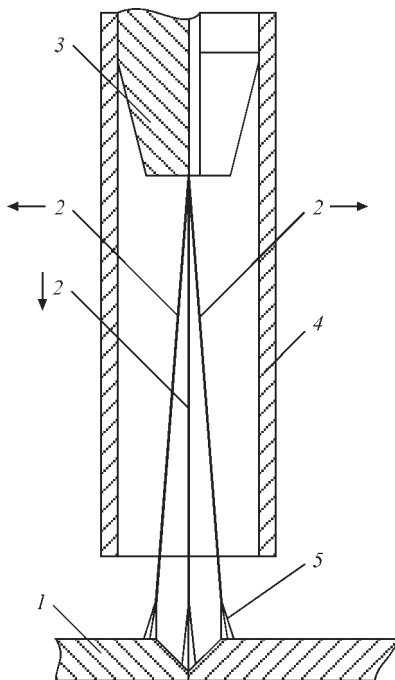


Рис. 13. Варіант принципу дії механізму при TIG зварюванні: 1 – зварювальні деталі; 2 – вольфрамовий електрод в положенні «без відхилення»; 2 – вольфрамовий електрод в положенні «крайне праве»; 2 – вольфрамовий електрод в положенні «крайне ліве»; 3 – затискач вольфрамового електрода пальника; 4 – сопло пальника; 5 – дуга

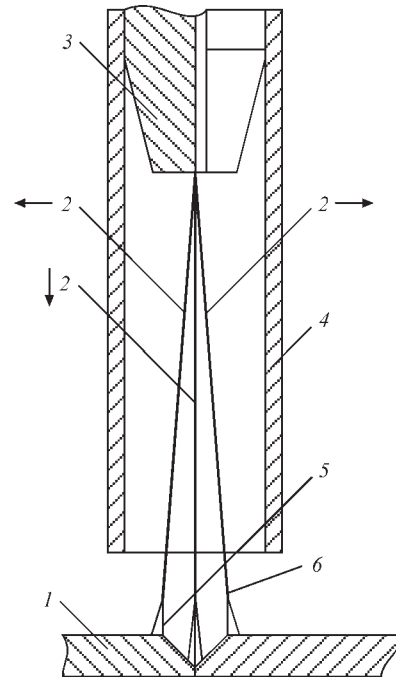


Рис. 14. Варіант принципу дії механізму при MAG зварюванні: 1 – зварювальні деталі; 2 – направляючий канал в положенні «крайне праве»; 2 – направляючий канал в положенні «без відхилення»; 2 – направляючий канал не гнучкий в положенні «відхилення вліво»; 3 – наконечник пальника; 4 – сопло пальника; 5 – дуга; 6 – зварювальний дріт

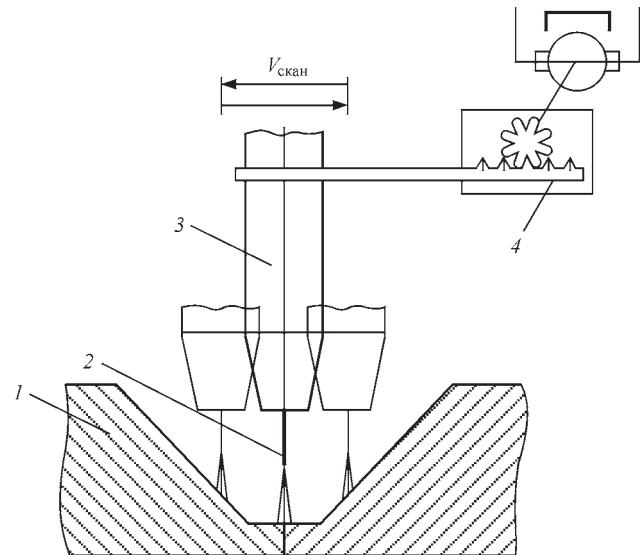


Рис. 15. Коливальний механізм для зварювання: 1 – зварювальна деталь; 2 – електрод; 3 – пальник; 4 – механізм колювань

кінця електрода може мати невелику зону сканування, достатньою для отримання сигналу слідкування, доцільно застосовувати механізм обертання електрода. Переміщення кінця електрода по колу здійснюється за допомогою того, що зварювальний дріт виходить з ексцентрично просвердленого наконечника горілки, який обертається разом зі стержнем пальника за допомогою електродвигуна.

Система розроблена та апробована в ІЕЗ ім. Є.О. Патона на принципі сканування ліній стику деталей електродом, що швидко обертається, з

відстеженням розкриття крайок зварювального виробу шириною від 2...5 мм, глибиною 5 мм, при відхиленні від напрямку руху апарата на кут до 30°.

Слід зазначити, що в рамках однієї статті неможливо охопити усі проблеми, які виникають при розробці, виготовленні та експлуатації систем слідкування з використанням скануючої дуги, тому тут розглядалися основні перспективні системи.

Принцип побудови електронних схем системи стеження з використанням скануючої дуги буде розглянуто в наступних публікаціях.

Висновки

1. Отримання якісного зварного з'єднання при дуговій технології зварювання з використанням автоматів та роботів можливе тільки при застосуванні слідкуючих систем.

2. Найбільш перспективними слідкуючими системами можуть стати системи стеження, в яких датчиком зворотного зв'язку є скануюча дуга.

3. Впровадження в промисловість автоматів та роботів, в яких використовуються інтелектуальні алгоритми обробки сигналів з дуги відкривають нові можливості автоматизації зварюваних процесів.

4. Системи стеження з використанням скануючої дуги нівелюють майже всі відхилення, які виникають при дуговому МiG та МаG зварюванні. Застосування цих систем потребує розробки нових технологій зварювання, які дозволять підвищити не тільки рівень автоматизації процесу зварювання, але й досягти покращення якості самого зварного з'єднання.

5. Використання системи стеження даного типу зводить до мінімуму вплив людини на якість зварного з'єднання, а також зменшує вартість зварювальних робіт за рахунок автоматизації процесу.

6. Використання скануючої дуги дає поштовх до освоєння нових технологічних прийомів при дуговому зварюванні.

Список літератури

1. Ахонін С.В., Білоус В.Ю. (2023) TiG зварювання у вузький зазор сталі 20 підвищеної товщини. *Автоматичне зварювання*, 6, 21–25.

ANALYSIS OF TRACKING SYSTEMS IN WHICH THE FEEDBACK SENSOR IS A SCANNING WELDING ARC (Review)

S.V. Tkachenko, T.G. Samoilova, V.A. Tkachenko

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

E-mail: patonmed@gmail.com

In arc welding technologies, arc welding machines and robots are widely used, which require application of tracking systems to orient the electrode relative to the product. Systematization and analysis of various tracking systems and description of their features and advantages are relevant. Tracking systems applied in automatic welding machines use various feedback signals, but the most accurate are signals picked up directly from the welding arc, when it is used as the measuring system sensor. The main principles of obtaining the feedback signals in arc welding are considered exactly for these systems, and their analysis is performed. 11 Ref., 15 Fig.

Key words: arc welding, welding arc, scanning arc, tracking system, arc sensor

2. Paton B.E., Zamkov V.N., Prilutsky V.P. (1996) Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium, *Welding J.*, 5, 37–41.
3. Чвертко А.И. и др. (1981) *Оборудование для механизированной дуговой сварки и наплавки*, Машиностроение.
4. Патон Б.Е., Бельфер М.Г., Богдановский В.А. и др. (1979) *Способ автоматической дуговой сварки швов с переменной шириной разделки кромок*. А.с. 2730981 СССР.
5. Лебедев В.К. (1992) *Фізика дуги та джерела живлення (тези доповідей конференції)*. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона.
6. Ткаченко В.А. и др. (1988) *Датчик положения свариваемого стыка*. А.с. 4494893 СССР.
7. Коперсак В.М. (2019) *«Термодинаміка та теплові процеси при зварюванні»*. Київ, Літера ЛТД.
8. Ахонин С.В., Білоус В.Ю. (2010) Сварка в узкий зазор высокопрочных титановых сплавов толщиной до 110 мм. *Автоматическая сварка*, 5, 44–48.
9. Ободянський А.В., Золотарів І.А. (1972) *Зварювальний посібник зі зварювання сталей*. Дніпропетровськ, Вид-во Промінь.
10. Кучук-Яценко С.И. и др. (1981) *Состояние и тенденции развития сварки дугой, вращающейся в магнитном поле*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.
11. Paton, B.E., Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P. (1996) Narrow-Groove Welding Proves Its Worth on Thick Titanium. *Welding J.*, 5, 37–41.

References

1. Akhonin, S.V., Bilous, V.Yu. (2023) Narrow-gap TIG welding of thick steel 20. *The Paton Welding J.*, 6, 18–23.
2. Paton B.E., Zamkov V.N., Prilutsky V.P. (1996) Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium, *Welding J.*, 5, 37–41.
3. Chvertko, O.I. etc. (1981) *Mechanized Arc Welding and Surfacing Equipment*. Mashinostroenie [in Russian].
4. Paton, B.E., Belfor, M.G., Bogdanovsky, V.A. et al. (1979) *Method of automatic arc welding with variable edge width of welds*. USSR author's cert. 2730981. Application 02.28.1979 [in Russian].
5. Lebedev, V.K. (1992) *Arc physics and power sources (Abstr. of Conf. Papers)*, Kyiv, PWI.
6. Tkachenko, V.A. et al. (1988) *Position sensor of the welded joint*. USSR author's cert. 4494893. Application 10.17.1988 [in Russian].
7. Kopersak, V.M. (2019) *Thermodynamics and thermal processes in welding*. Kyiv, Litera Ltd [in Ukrainian].
8. Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Romanyuk, V.S. et al. (2010) Narrow-gap welding of up to 110 mm thick high-strength titanium alloys. *The Paton Welding J.*, 5, 34–37.
9. Obodianskyi, A.V., Zolotariv, I.A. (1972) *Reference book on welding of steels*. Dnipropetrovsk, Promin [in Ukrainian].
10. Kuchuk-Yatsenko, S.I. et al. (1981) *The state-of-the-art and tendencies of the development of magnetically impelled arc welding*. Kyiv, PWI [in Russian].
11. Paton, B.E., Zamkov, V.N., Prilutsky, V. P. (1996) Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium. *Welding J.*, 5, 37–41.

Отримано 03.11.2023

Отримано у переглянутому вигляді 24.11.2023

Прийнято 08.12.2023