

НОВІ ПІДХОДИ У КЕРУВАННІ ПРОЦЕСАМИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) давно й успішно використовується у різноманітних галузях промисловості — в енергетиці, машино- і суднобудуванні, авіакосмічній та хімічній індустрії, в електроніці тощо. Нагрівання зварних елементів електронним пучком у локальній зоні, можливість концентрації струму великої потужності і створення високого вакууму в робочому об'ємі сприяють використанню цієї технології для зварювання будь-яких комбінацій металургійно сумісних металів і сплавів, у тому числі тугоплавких та хімічно активних. Істотною перевагою ЕПЗ є збереження, завдяки вакуумному захисту, вихідної чистоти металу зварного з'єднання, при цьому забезпечується одержання зварних з'єднань з високою корозійною стійкістю. Це надзвичайно важливо для металів, які працюють в особливо агресивних середовищах.

Порівняно з методами зварювання киснево-ацетиленовим полум'ям та електричною дугою у технології ЕПЗ середня площа плями нагрівання відповідно на п'ять і чотири порядки менша, і при цьому у десять і п'ять тисяч разів більша найвища густина потужності струму у плямі ($\text{Вт}/\text{см}^2$). Це забезпечує необхідну швидкість проплавлення країв зварних деталей [1, 2]. А чим менша пляма, тим менше руйнується кристалічна структура у зварних зразках. За цими параметрами електронний промінь лише дещо поступається світловому променю оптичного квантового генератора. Проте к.к.д. перетворення енергії електричної мережі на енергію нагрівання і плавлення металу у променя лазера вдсятеро менший, аніж в електронного променя.

Нові обрії у впровадженні технології ЕПЗ безпосередньо пов'язані зі створенням автоматизованих систем керування широкої функціональної спрямованості, які дають змогу реалізувати зварювання великої номенклатури виробів сучасної техніки.

Сьогодні завдяки розвитку комп'ютерних технологій вищий рівень автоматизації в ЕПЗ забезпечують системи керування, принцип роботи яких ґрунтується на фізичних параметрах взаємодії електронного пучка з матеріалом зварного виробу. При цьому як параметри керування можуть використовуватися вторинна електронна емісія, іонний потік плазми, рентгенівське випромінювання, струм проплавлення тощо.

Незважаючи на досягнуті успіхи в розробці автоматизованих систем керування електронно-променевим зварюванням, тут є ще чимало нерозв'язаних проблем [3]. Це, зокрема, завдання розпізнавання **довільного криволінійного зварного стику** і керування розміщенням пучка у місці цього стику. Адже розвиток сучасного виробництва потребує розширення асортименту різноманітних зварних конструкцій. А їхнє виготовлення пов'язане з необхідністю складного процесу зварювання, внаслідок якого утворюються найрізноманітніші криволінійні стики. Сьогодні вже добре освоєні технології зварювання канонічних криволінійних стиків (коло, еліпс, похилена пряма). Тим часом розпізнавання довільних криволінійних стиків, тобто визначення їхніх параметрів, досі залишалося невирішеним завданням в автоматизації електронно-променевого зварювання.

Автору вдалося розв'язати вказані проблеми за допомогою методів півколової і телевізійної розгортки із застосуванням їх математичного аналізу. При цьому довільний криволінійний зварний стик (рис. 1) може бути замкнутим або розімкнутим.

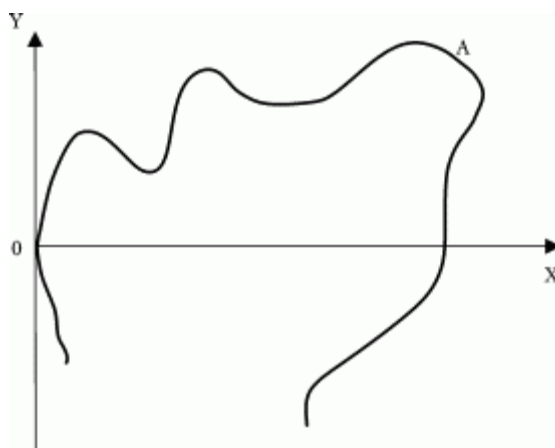


Рис. 1. Довільний криволінійний зварний стик

Півколова розгортка — це сукупність імпульсів електронно-променевої гармати (ЕПГ), які падають у точках півкола за час T з деяким кроком. При цьому з комп'ютера подаються точні значення величини відхилення електронного пучка по осях OY і OX .

Визначаються ці величини синусоїдальним і косинусоїдальним струмами, які задаються з комп'ютера через цифровий аналоговий перетворювач. На кожному кроці сканування з достатньою точністю встановлюється градієнт руху електронного пучка, і залежно від його значення здійснюється сканування правим, лівим, верхнім або нижнім півколом. Під час зварювання тричі на секунду протягом 3—5 мс скидається струм великої потужності і виконується сканування струмом малої потужності вперед, за напрямком градієнта руху, відповідною півколовою розгорткою — для визначення цього градієнта на новому етапі зварювання, а також сканування назад протилежною розгорткою, яка використовується у разі зіскакування електронного пучка зі стику [4]. Реалізація даного методу стала можливою завдяки появі швидкодіючих (які мають швидкість від 1 МГц) цифрових аналогових перетворювачів.

Хоча півколова розгортка досить результативна, однак для оператора зручнішою є телевізійна розгортка, адже у цьому випадку він має можливість бачити картинку реального стику на моніторі комп'ютера.

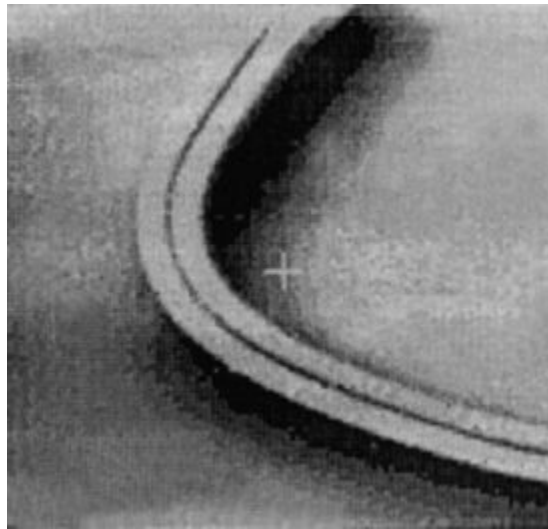


Рис. 2. Телевізійна розгортка

Телевізійна розгортка (рис. 2) — це збереження ділянки поверхні зварного стику і прилеглих до нього поверхонь зварних деталей, які бомбардуються електронним пучком. Таке зображення отримуємо на виході плати адаптера як результат аналізу посиленого і стабілізованого вторинного емісійного струму. Він виникає внаслідок уловлювання датчиком, розміщеним у площині XOY , електронів пучка, відбитих від бомбардованої поверхні. Ширина і висота телевізійної розгортки залежать від параметрів електронно-променевої гармати і фокальної відстані до бомбардованої поверхні. Області стику відповідають точки з найбільшим почорнінням.

Телевізійна розгортка зберігається у комп'ютері у вигляді двовимірного масиву (матриці A) натуральних чисел, кожне з яких відповідає якомусь відтінку сірого, білого і чорного кольорів. Наприклад, білому кольору відповідають найбільші числа масиву, чорному — найменші.

Масив чисел аналізується статистичними методами — для визначення елементів стику, точніше — елементів масиву, які відповідають області криволінійного зварного стику. Для цього застосовуємо алгоритм скануючих півквадратів, який ґрунтується на русі уздовж елементів стику підматриці матриці A . Тут використовуємо градієнт напрямку руху вздовж стику і значення домінантної сторони або сторони, обраної на попередньому кроці підматриці, до якої добудовується нова підматриця.

Щоб визначити елементи стику, аналізуємо вибірки, складені з елементів середнього рядка, середнього стовпчика, головної і побічної діагоналей нашої підматриці. Для з'ясування нового значення градієнта руху вздовж стику і сторони, до якої необхідно добудувати нову підматрицю, використовуємо скануючу вибірку з елементів першого та останнього рядків і стовпчиків підматриці, що утворюють за формою верхній, нижній, лівий та правий півквадрати.

З метою оцінки найкращої вибірки та визначення градієнта руху вздовж стику і домінантної сторони аналізуємо математичні очікування, дисперсії вибірок. При цьому застосовуємо так званий критерій Пірса з рівнем значущості 0,01, який дозволяє встановити значущість або випадковість відхилення значень елементів вибірок від нормального розподілу [5].

Використання цього критерію дає змогу автоматично надійно й достовірно розпізнавати краплі металу на зварному стикі та знаходити його закінчення. Наприкінці аналізу

телевізійної розгортки проводяться обчислення для з'ясування, на яку величину слід перемістити електронно-променевою гармату або відхилити електронний пучок. Наступну розгортку будемо залежно від того, на якій стороні попередньої закінчився стик. Якщо, наприклад, стик закінчився на верхній стороні, тоді середина нижньої сторони нової телевізійної розгортки має збігатися з останньою знайденою точкою стику попередньої розгортки.

Готуючись до процесу зварювання, доцільно провести операцію, яку названо навчанням, — знайти точки зварного стику. В ході зварювання тричі за секунду струмом малої потужності скануємо і визначаємо точки стику. Знаходимо неперервну підпоследовність встановленої на етапі навчання последовності точок зварного стику. При цьому виходимо з умови мінімальності абсолютної величини відхилення дисперсій абсцис та ординат точок знайденої підпоследовності і точок стику, визначених з розгортки, яку отримали при скануванні. Тоді відхилення від стику є різницею математичних очікувань цих последовностей точок. Якщо центр телевізійної розгортки жорстко пов'язаний із розташуванням електронно-променевої гармати, величину відхилення від стику визначаємо за віддаленням центру розгортки від точок стику, знайдених під час сканування. Коригуванням руху електронно-променевої гармати чи відхилення пучка електронів повертаємо останній в область зварного стику.

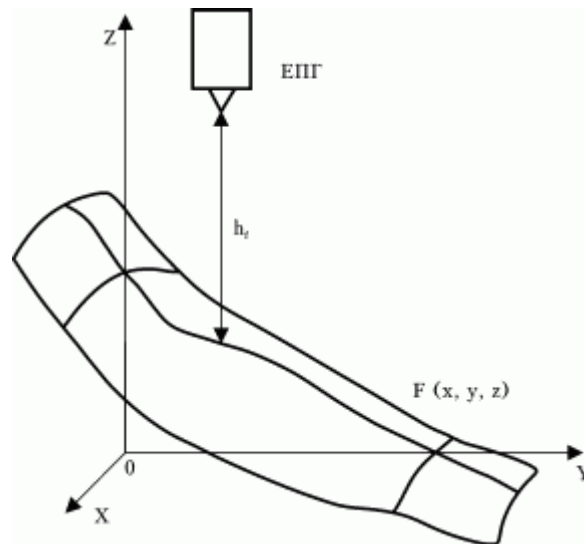


Рис. 3. Відстань ЕПГ до зварної поверхні

Під час зварювання важливо, щоб глибина проплавлення була постійною. Для цього необхідно забезпечити незмінність фокусної відстані h_f (рис. 3) електронно-променевої гармати до поверхні зварних виробів. У випадку довільного просторового зварного шва потрібно переміщувати електронно-променевою гармату по осі OZ . Якщо розмістити ще два датчики у площинах XOZ і YOZ , тоді одержимо ще дві телевізійні розгортки, які дають зображення стику у двох вертикальних координатних площинах. Застосувавши до отриманих у такий спосіб розгорток викладений вище алгоритм розпізнавання точок зварного стику, отримаємо три проекції. За ними здійснюємо чисельне відновлення просторового довільного криволінійного зварного стику і визначаємо величину переміщення електронно-променевої гармати по осі OZ з точністю до одного пікселя.

Описана методика дає змогу обходитися без оптико-електронних вимірювальних пристроїв та уникати багатьох проблем, пов'язаних з напленням металом поверхні оптичних дзеркал і світловипромінювачів та з фільтрацією світлових завад, які створює у процесі зварювання світна зварна ванна.

Розпізнавання довільного криволінійного плоского і просторового зварного стиків може стати ще одним кроком в автоматизації систем керування зварювальним виробництвом. Методи півколової і телевізійної розгорток помітно розширюють можливості електронно-променевого зварювання в умовах високого вакууму.

1. *Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др.* / Под ред. Б.Е. Патона. Електронно-лучевая сварка. — К.: Наук. думка, 1987. — 256 с.
2. *Назаренко О.К.* Лучевые способы сварки. — К.: Наук. думка, 1983. — 72 с.
3. *Поляков В.Г., Переверзев-Орлов В.С.* Электронные системы следящей развертки. — М.: Энергия, 1968. — С. 192.
4. *Спосіб* електронно-променевого зварювання довільного криволінійного зварного стику / Богданов В.Р.; заявка на а.с. №20002065426; заявл. 14.06.2002.
5. *Спосіб* електронно-променевого зварювання довільного криволінійного зварного стику / Богданов В.Р.; заявка на а.с. №20002065427; заявл. 14.06.2002.

В. БОГДАНОВ,
кандидат фізико-математичних наук,
науковий співробітник Інституту
електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України