

УДК 621.791

А.Є. Пірумов, М.В. Шевченко, І.О. Скачков

МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ЗВАРЮВАННЯ ЗА ЕЛЕКТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕСУ

This article presents the analysis results of existing methods of monitoring the quality of welded joints by electric parameters of the arc. Their advantages and disadvantages are described. We show that there is a need to use a large number of related parameters when creating automatic systems for monitoring the quality of welded joints by electrical parameters of the process. It requires a complex math-based environment. The systems of artificial intellect can be used as such an environment. Determining the relationships between these parameters requires a great deal of experimental research. In most cases it is not economically feasible. We propose to utilize the mathematical models to solve this problem.

Вступ

Існуючі методи неруйнівного контролю зварних з'єднань потребують наявності складного устаткування та великих трудовитрат, що зменшує продуктивність виробництва зварних конструкцій. Проводити контроль якості для кожного шва не є ефективним і економічно доцільним, особливо при серійному виробництві чи при зварюванні в складних умовах, наприклад під водою, хоча вимоги до якості всіх швів однакові для кожного виробу. Зазначимо, що при зварюванні під водою жоден з методів контролю якості не гарантує визначення якості з'єднання взагалі.

Перспективним напрямом досліджень є отримання показників якості з'єднання за енергетичними параметрами дуги. Такий підхід видається найбільш вдалим для моніторингу якості зварного з'єднання при масовому виробництві, оскільки виключає необхідність використання додаткового обладнання та додаткових людських ресурсів. Для аналізу таких параметрів все частіше застосовуються інтелектуальні системи. Вони зменшують участь людини в процесі контролю і тим самим знижують суб'єктивність і вартість контролю. Існує багато різних підходів до побудови інтелектуальних систем, які б дали змогу проводити контроль якості зварювання за електричними параметрами [1–8].

Актуальною є задача визначення можливостей побудови нових сучасних систем моніторингу якості зварювання за електричними параметрами процесу на основі систем штучного інтелекту.

Постановка задачі

Мета статті – підготувати підґрунтя для розроблення систем моніторингу якості зварних з'єднань за електричними параметрами

зварювання в автоматичному режимі як можливої альтернативи існуючим методам неруйнівного контролю якості зварних з'єднань, особливо для способів зварювання, де контроль з'єднань неможливий або ускладнений. Для цього необхідно провести аналіз існуючих підходів до моніторингу якості зварних з'єднань, розглянути різноманітні види методів аналізу, що застосовуються в зварюванні, а також визначити параметри, за якими можливо проводити моніторинг.

Огляд напрямів створення систем моніторингу якості зварювання

При створенні систем моніторингу якості на основі електричних параметрів слід враховувати спосіб зварювання, характеристики з'єднання, властивості матеріалу конструкції тощо.

Проблеми, зумовлені існуванням великої кількості взаємопов'язаних параметрів у зварюванні, вирішуються завдяки досвіду експертів у цій галузі. Для практичного застосування більш дієвим є математичне моделювання, яке дає можливість вирішувати специфічні проблеми.

Існує кілька видів моделей. Одні базуються на металургії та фізиці процесу зварювання – детерміновані [9]. Вони потребують набору знань експертів. Інші моделі є стохастичними і побудовані на основі статистичного аналізу набору експериментальних даних [10].

Використання детермінованих моделей зварювальної дуги дає змогу аналізувати фізичні явища процесу, але створення такої моделі вимагає врахування багатьох явищ, що відбуваються під час процесу дугового зварювання, наприклад таких: зміна контактного опору у наконечнику, характеристика потоку захисного газу, зміна опору внаслідок раптової зміни вольтоутворення електрода, коефіцієнти температуропровідності, теплопровідності тощо. Це в більшос-

ті випадків неможливо, хоча використання детермінованих моделей може забезпечити необхідну адекватність математичних моделей зварювальної дуги для побудови систем моніторингу якості.

Моделі, що отримані експериментально-статистичними методами, досить широко використовуються для прогнозування якості зварних з'єднань і керування, оскільки вони відображають закономірності процесу зварювання конкретного виробу обладнанням конкретного типу.

Новим напрямом в цій галузі є моделювання із використанням систем штучного інтелекту, які дають можливість отримати необхідний зв'язок між багатьма вхідними та вихідними параметрами, що важливо при зварюванні.

Відомо [11], що інформацію, на підставі якої можна прогнозувати якість зварного з'єднання і вводити відповідні коригувальні дії, можна отримувати за допомогою аналізу фізичних параметрів зварювальної дуги, в т.ч. і електричних. Використання енергетичних параметрів зварювальної дуги як джерела інформації про якість зварного з'єднання потребує мінімальних апаратних засобів, не збільшує, як правило, масо-габаритні показники виконавчих пристроїв зварювальних установок. Крім того, зварювальна дуга, використана як вимірювальний інструмент, практично безінерційна.

Основними параметрами, що впливають на отримання якісного зварного з'єднання під час дугового зварювання і які можна контролювати, є: струм зварювання; швидкість подачі електродного дроту; напруга на дузі; виліт електрода; швидкість зварювання; орієнтація пальника; положення стику; склад захисного газу; тип електродного дроту і його діаметр.

Всі наведені параметри тісно пов'язані між собою, наприклад глибина проплавлення залежить від сили струму, а струм може коливатись у межах $\pm 20\%$ тільки за рахунок зміни вольту електрода тощо.

При орбітальному зварюванні кількість можливих параметрів сягає 80 [12]. Дослідження цих параметрів на трьох рівнях для кожного становить 3^{80} . Якщо ж вибирати меншу кількість параметрів, наприклад п'ять найважливіших, то кількість можливих комбінацій при трьох рівнях зменшується до 3^5 , або 243. Дослідження кожної комбінації є досить важким завданням і потребує значних матеріальних затрат. Крім того, залежність між багатьма параметрами є нелінійною.

На сьогодні зварювальний процес можна розглядати як сукупність трьох операцій [13] (рис. 1).



Рис. 1. Базові операції процесу зварювання із використанням моніторингу з'єднань

У зварюванні часто використовується оцінювання, яке базується на статистичних методах управління якістю [10]. Особливо це стосується перевірки конструкції після її виготовлення, при прийманні. Використання статистичних методів управління якістю продукції направлене на вдосконалення системи контролю та його організації [14]. Статистичні методи не замінюють інші методи та засоби контролю, але можуть значною мірою підвищити їх ефективність, достовірність та економічність. Згідно з [15] термін “поточний контроль” замінено терміном “статистичне регулювання” технологічного процесу, який визначається як “коригування параметрів технологічного процесу продукції, що виготовляється для технологічного забезпечення необхідної якості та попередження браку”.

Вимірюванню, контролю і керуванню зварюванням приділяють значно більшу увагу, ніж статистичному аналізу зварювання. Частково це пояснюється тим, що перші три процеси становлять єдине технологічне коло, що починається з вимірювання параметрів зварювання і закінчується керуванням (коригуванням) цих параметрів і яке, у багатьох випадках, задовольняє вимоги виробництва.

Спочатку головною метою застосування статистичного аналізу процесу електродугового зварювання, що відноситься до середини 60-х рр. минулого сторіччя, було отримання нової, раніше недоступної, інформації, необхідної для більш глибокого розуміння і розвитку теорії

даного процесу зварювання. Однак великі труднощі реалізації таких досліджень (складність об'єкта дослідження, необхідність застосування складного і дорогого устаткування, необхідність залучення високопрофесійних дослідників тощо) обмежували його широке застосування.

На сьогодні ситуація із застосуванням статистичних методів дослідження у сфері електродугового зварювання істотно покращилася. Його використання стало загальнодоступним і дуже розширилося після приходу в наукові лабораторії персональних комп'ютерів. Високі технічні характеристики комерційно доступного устаткування, використовуваного для реалізації статистичного аналізу процесу електродугового зварювання, а також його доступні ціни сприяють усе більш широкому застосуванню статистичного методу у сфері досліджень, навчання і промислового виробництва. Завдяки використанню стандартних блоків і програм обробки системи статистичного аналізу процесу зварювання стають усе більш ідентичними, дешевшими і, отже, доступнішими.

Більшість відомих автоматизованих систем, що використовуються в зварюванні, дають можливість виконувати такі операції [1, 2]: технічне проектування; оцінка часу і витрат; підрахунок зварюваності і температури попереднього підігріву; вибір зварювальних матеріалів; рекомендації щодо процедури зварювання; оцінка кваліфікація зварників і обладнання; металургійні розрахунки; розрахунки деформації; виявлення дефектів шва; керування процесом.

Контроль якості з'єднань за параметрами процесу умовно можна розділити на три напрямки.

1. *Прогнозування геометричних характеристик з'єднання із використанням штучних нейронних мереж.* У зварюванні нейронні мережі можуть використовуватися для апроксимації даних і керування процесом зварювання [16, 17]. Параметри форми шва і проплавлення розраховувалися з використанням штучних нейронних мереж для TIG-зварювання [18]. Для моделювання будь-якої простої операції контролю якості зварювання достатньо мати нейронну мережу з такою архітектурою: вхідний шар нейронів, прихований шар нейронів із нелінійною передавальною функцією, вихідний шар нейронів із лінійною функцією. Вхідними параметрами можуть бути: струм зварювання, напруга на дузі, швидкість зварювання, величина вильоту електрода, величина зазору між деталями, кут нахилу пальника.

Використання нейронних мереж дає можливість прогнозувати геометричні параметри шва з похибкою 4,63 і 6,7 % [19]. В подальшому отриману систему на базі нейронних мереж можна використовувати під час створення інтелектуальних контролерів для керування процесом зварювання з метою отримання бажаних геометричних характеристик шва.

2. *Визначення збурюючих факторів, що впливають на якість з'єднання.* Поява дефектів зварного з'єднання пов'язана з дією одного або кількох джерел збурень під час зварювання. Так, наприклад, при зварюванні із короткими замиканнями причини, що призводять до неповного проплавлення, можуть бути такими: недостатній зазор, невідповідність режимів зварювання та товщини деталей, недостатній кут розробки кромки, неправильно підібрана швидкість зварювання, нестабільність процесу зварювання, великий виліт тощо [20].

Існують два фундаментальні фактори, що впливають на розплавлення основного металу: введення тепла та втрати тепла. Баланс цих двох факторів дає змогу отримувати рівномірне проплавлення металу.

Використання електричних параметрів дуги для контролю якості з'єднань можливе при створенні системи контролю якості зварних з'єднань для MIG-зварювання на основі використання системи Fuzzy Logic, яка належить до систем штучного інтелекту. Такий підхід дає можливість отримати точність виявлення дефектів 92 % [21]. Існує можливість виявлення збурень і за допомогою нейронних мереж, що особливо важливо при зварюванні у складних умовах, наприклад при підводному мокрому зварюванні. Використання такого методу дає змогу контролювати кожне з'єднання і виявляти збурення із похибкою, що не перевищує 12 % [3, 4].

3. *Неперервний моніторинг із використанням електричних параметрів зварювання.* Безперервний моніторинг якості — актуальна задача в світі скорочення виробничої вартості і покращення якості швів. Системи автоматичного визначення якості повинні вміти класифікувати дефекти, такі як пористість, непровари, порушення геометрії валика шва, надмірне підсилення, пропали.

На сьогодні в світі відомі і комерційно доступні [22] системи моніторингу параметрів зварювання такі, як ADM III, Arc Guard, Analysator Hannover, Weldcheck. Всі вони працюють за однаковим алгоритмом: вимірюються



Рис. 2. Сфери застосування і методи обробки цифрових даних про електричні параметри дуги

струм, напруга та інші параметри процесу, порівнюються зі встановленими номінальними значеннями. У випадку виходу параметра за встановлені межі системи сигналізують про це.

Енергетичні параметри дуги використовувалися для виявлення дефектів при зварюванні на постійному струмі плавким електродом у середовищі захисного газу Ar [23]. При виявленні дефектів було використано порівняння стандартного відхилення для конкретного зварювання із лінією базового стандартного відхилення, що була отримана при зварюванні бездефектних швів. Така система виявляла дефекти на п'яти зразках з шести.

У галузі MAG-зварювання сталей дослідники виконували фізичний [24] і статистичний аналіз сигналів [5, 25]. Однак проблеми класифікації швів за якістю все одно залишаються.

Відомі розробки в галузі контактного точкового зварювання. На основі алгоритмів із використанням нечіткої логіки реалізовано контроль якості під час зварювання міжелементних з'єднань акумуляторів [6]. Розроблено контролер КСУ КС 02 [7], де реалізований адаптивний алгоритм контролю якості [8].

Сфери застосування та методи обробки цифрових даних з метою їх аналізу для отримання інформації про якісні характеристики зварювального процесу подано на рис. 2.

Таким чином, використання електричних параметрів процесу зварювання відкриває широкі перспективи для створення систем конт-

ролю та моніторингу якості зварних з'єднань. Це дасть можливість значно скоротити витрати при виготовленні зварних конструкцій.

Висновки

У статті проаналізовано сучасні підходи до створення систем моніторингу дугового зварювання за електричними параметрами дуги.

Показано, що наявність великої

кількості пов'язаних параметрів для отримання інформації про якість зварного з'єднання потребує використання складного математичного апарату для їх обробки. Тому в таких системах доцільно використовувати системи штучного інтелекту.

Використання штучних нейронних мереж видається найбільш оптимальним варіантом для створення автоматичних систем контролю якості зварних з'єднань. Однак використання лише електричних параметрів дуги не дає змоги визначати дефекти металургійного характеру й ті, що пов'язані з тепловими процесами. Визначення таких дефектів потребує аналізу додаткових параметрів процесу зварювання.

Побудова систем моніторингу якості зварних з'єднань потребує наявності великої кількості експериментальних даних, отримання яких не завжди можливе. Розв'язувати цю задачу доцільно з використанням математичних моделей. При адекватному моделюванні такий підхід дає значне зменшення кількості експериментів зі збільшенням кількості даних для побудови систем моніторингу.

Подальша робота буде присвячена моделюванню процесу дугового зварювання та побудові автономних систем моніторингу дугового зварювання на базі систем штучного інтелекту із врахуванням металургійних і теплових явищ при зварюванні, що є новим напрямом діяльності в цій галузі.

1. Lucas W., Bourton M.A., Anderson P.C.J. Multimedia expert system for shielding gas selection // Proc. of the 6th Int. Conf. on Computer Technology in Welding, Lanaken, Belgium, 9–12 June 1996. – The Welding Institute, UK. – P. 1.
2. Лазарсон Э.В. Методы искусственного интеллекта в сварке. Ч.1. Сбор и формализация знаний // Сварочное производство. – 2003. – № 5. – С. 24–28.
3. К вопросу применения нейронных сетей для контроля качества сварных соединений при подводной сварке / И.О. Скачков, А.Е. Пирумов, С.Ю. Максимов, Е.А. Прилипко // Автоматическая сварка. – 2006. – № 6. – С. 27–31.
4. Пирумов А.Є., Скачков І.О., Максимов С.Ю. Контроль якості підводного дугового мокрого зварювання за електричними параметрами дуги // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2006. – № 2. – С. 76–81.
5. Automatic quality monitoring in robotised GMA welding using a repeated sequential probability ratio test method / S. Adolfsson, A. Bahrami, G. Bolmsjo, I. Claesson // Int. Journal for the Joining of Materials. – 1997. – N 9. – P. 2–8.
6. Контроль качества контактной точечной сварки межэлементных соединений аккумуляторов на основе нечеткой логики / Н.В. Подола, П.М. Руденко, Н.П. Горун, В.М. Ягнятинский // Автоматическая сварка. – 1999. – № 5. – С. 42–45.
7. Руденко П.М., Гавриш В.С. Система автоматического управления и контроля процесса контактной точечной сварки КСУ КС 02 // Там же. – 2007. – № 11. – С. 43–45.
8. Подола Н.В., Руденко П.М., Гавриш В.С. Применение адаптивного алгоритма для контроля качества сварки в системах управления контактными точечными машинами // Там же. – 2004. – № 6. – С. 15–18.
9. Сидорец В.Н., Жерносеков А.М. Численное моделирование системы источник питания–дуга с плавящимся электродом // Там же. – 2004. – № 2. – С. 10–16.
10. Тараричкін І.О. Статистичні методи забезпечення якості продукції зварювального виробництва: Монографія. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2002. – 336 с.
11. Букаров В.А., Ищенко Ю.С. Оценка качества швов по осциллограммам параметров режима сварки // Сварочное производство. – 1977. – № 12. – С. 174–183.
12. Engelhard G., Pellkofer D., Schuchardt K. WIG-Orbitalschweissen // Proc. of DVS/SLV, WIG-Orbitaltechnik Conf., Erding, Germany, May 1995. – Erding, 1995. – P. 32–40.
13. Xie M., Bolmsjo G. Quality assurance and control for robotic GMA welding. Part 1. QA model and welding procedure specification // Joining Sciences. – 1993. – N 1 (4). – P. 212–220.
14. Пономарев В.Е. Разработка рекомендаций по оптимизации технологии сварки в защитных газах на основе исследования влияния технологических факторов на перенос электродного металла (№ 2591 от 27.12.02). – К.: Научно-техн. комплекс "ИЭС им. Е.О. Патона" НАН Украины, 2003. – 226 с.
15. Статистические методы управления качеством продукции: ГОСТ 15895–77. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 47 с.
16. Martin P.J. Artificial neural networks in welding // Int. J. for the Joining of Materials. – 1994. – N 6. – P. 62–67.
17. Mishra S., Debroy T. Genetic Algorithm and Gradient–Descent–Based Neural Network with the Predictive Power of a Heat and Fluid Flow Model for Welding // Welding Journal. – 2006. – N 11. – P. 231–242.
18. Machine Vision Analysis of the Welding Region and Its Application to Seam Tracking in GTAW and GMAW / Y. Li, L. Wu, D. Cheng, J.E. Middle // Proc. Of the 3rd Int. Conf. on Trends in Welding Research. – Gatlinburg, 1993. – P. 1021–1025.
19. Zhang G.J., Chen S.B., Wu L. Intelligent Control of Pulsed GTAW with Filler Metal // Welding Journal. – 2005. – N 1. – P. 9–16.
20. Цыбулькин Г.А. К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Автоматическая сварка. – 2002. – № 5. – С. 17–19.
21. A Fuzzy Logic System for Process Monitoring and Evaluation in GMAW / C.S. Wu, T. Pole, D. Rehfeldt // Welding Journal. – 2001. – N 2. – P. 33–38.
22. Blakeley P.J. Developments in monitoring systems for resistance and arc welding // Proc. of the Int. Conf. on Automated Welding Systems in Manufacturing, Gateshead, North East UK, November 1992. – Woodhead Publishing Ltd, 1992. – P. 40.
23. Arc Sensing for Defects in Constant – Voltage Gas Metal Arc Welding / T.P. Quinn, C. Smith, C.N. McCowan et al. // Welding Journal. – 1999. – N 9. – P. 322–328.
24. Hermans M.J.M., Spikes M.P., den Ouden G. Characteristic features of the short circuiting welding process // Welding Review Int. – 1993. – N 12. – P. 80–86.
25. A Wavelet Transform – Based Approach for Joint Tracking in Gas Metal Arc Welding / J.X. Xue, L.L. Zhang, Y.H. Peng, L. Jia // Welding Journal. – 2007. – N 4. – P. 90–96.