

## МОНІТОРИНГ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДУГОВОГО РОБОТИЗОВАНОГО ЗВАРЮВАННЯ

І. О. СКАЧКОВ

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: i.skachkov@kpi.ua

В умовах роботизованого зварювання важливим є забезпечення безперервного моніторингу виготовлення зварної конструкції. Стосовно до процесів МІГ/МАГ зварювання перевагу слід віддавати контролю за електричними параметрами дуги, які узагальнюють умови протікання технологічного процесу протягом 1 с. Комплексна оцінка електричних параметрів може бути здійснена на площині «струм дуги–напруга на дузі». Висновки про наявність збурень слід проводити за допомогою коефіцієнтів вейвлет-розкладання Хаара. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 2.

*Ключові слова:* зварювання плавким електродом в захисних газах, роботизація, моніторинг якості, двомірні вейвлет-перетворення Хаара

Забезпечення якості зварного з'єднання у виробничих умовах зводиться переважно до стабілізації умов виробництва у всіх аспектах. Це потребує суворого контролю технології, стану обладнання, забезпечення відповідної кваліфікації персоналу. Роботизація сприяє виконанню зазначених умов і, водночас, потребує їх суворого виконання. Однак навіть при суворому дотриманні всіх вимог забезпечення якості потребує застосування контролю технологічного процесу і випробувань готової продукції. Найбільш поширеними методами підтвердження відповідності якості продукції, як правило, є статистично обґрунтовані плани вибіркового контролю за адекватними щодо обраних груп дефектів методикам [1]. Стосовно зварювання всі відомі методи контролю якості з'єднання мають обмежену сферу застосування, тобто здатні виявляти лише певні групи дефектів.

За впливом на матеріал або виріб ці способи контролю якості групуються на два класи: методи руйнівного і неруйнівного контролю. Очевидно, що методи руйнівного контролю застосовуються тільки вибірково і можуть дати лише оцінку якості виробів, які йдуть в експлуатацію з певною ймовірністю. Всі прийняті до застосування в промисловості методи неруйнівного контролю зварних з'єднань спрямовані на виявлення певних дефектів, що призводять до порушення вимог щодо суцільності, геометричних розмірів, фізико-механічних або фізико-хімічних властивостей як шва, так і біляшовної зони. З технічних і економічних причин методи неруйнівного контролю найчастіше також застосовуються вибірково і, отже, можуть дати лише вірогідну оцінку якості виробів.

Це обумовлює необхідність моніторингу процесу виготовлення зварної конструкції, що вклю-

чає як перевірку якості готового або проміжного продукту методами руйнівного і неруйнівного контролю, так і контроль відповідності параметрів технологічного процесу заданим.

Підготовка виробництва при роботизованому зварюванні спрямована, поряд з вирішенням інших задач, на створення умов, що забезпечують стабільність умов зварювання. Однак це не може повністю виключити утворення різноманітних дефектів формування та металургійних дефектів, що виникають через низку енергетичних, кінематичних та технологічних збурень, спричинених як випадковими зовнішніми чинниками на кшталт зміни напруги живильної мережі, так і виходом з ладу устаткування. В останньому випадку можливе забруднення зварюваних поверхонь мастилом, порушення газового захисту, тощо. Деякі технологічні збурення, як правило, мають місце через технічні і економічні обмеження на підвищення точності підготовки деталей під зварювання. Виміряти або хоча б оцінити рівень збурень при роботизованому зварюванні часто неможливо з технічних або економічних причин. Це стосується, в першу чергу, таких чинників як порушення газового захисту, зміни зазору або перевищення кромки, наявність забруднень на поверхні деталей. Однак такі невідповідності умов перебігу зварювання можуть чинити істотний вплив на формування з'єднання. При роботизованому зварюванні контроль якості з'єднання здійснюється тільки на певних етапах технологічного процесу виготовлення конструкції. Тому невідповідності перебігу зварювання можуть призводити до суттєвих матеріальних витрат.

Традиційно моніторинг технологічного процесу за параметрами режиму здійснюють шляхом реєстрації їх відхилень від заданих значень. Кількість параметрів визначається способом зварювання і можливістю вимірювання контролюва-

них параметрів при зварюванні конкретного виробу. Контролю підлягає деяка узагальнена оцінка параметра — середнє чи середньоквадратичне значення.

За великої кількості контрольованих параметрів виникає проблема комплексної їх оцінки. Поєднання значень значної кількості параметрів, які перебувають в межах встановлених допусків, може іноді привести до дефекту внаслідок несприятливого їх поєднання. Зменшення допусків при цьому може призвести до визнання невідповідною деякої частки якісної продукції.

Найбільш прийнятним і фізично обґрунтованим методом безперервного моніторингу якості зварних з'єднань, отриманих електричним зварюванням, є аналіз енергетичних параметрів зварювального процесу [2]. Наявність природних зворотних зв'язків між джерелом нагріву і з'єднанням, що формується, робить принципово можливим оцінити процес формування з'єднання за електричними параметрами джерела нагріву. Природна мінливість процесу формування веде до появи стохастичної компоненти в електричних параметрах джерела нагріву. Для різних способів зварювання стохастична складова по різному відображає процес формування з'єднання. Так, для зварювання МАГ/МІГ наявність збурень призводить до зміни рухливості електродної плями на поверхні ванни і порушення вісесиметричності сил, що діють на краплю електродного металу, тобто на перенос електродного металу. Це впливає на миттєві значення струму і напруги на дузі та вносить певні стохастичні складові в осцилограми. Таким чином, основна ідея моніторингу полягає в порівнянні деякого ідеального образу стохастичного процесу з поточним.

Дослідження проводились при зварюванні тонколистової сталі плавким електродом ER-49-1 (Св-08Г2С) діаметром 0,8 мм в середовищі суміші МІХ1 (82%Ar+18%CO<sub>2</sub>) струм 80 А. Досліджувались зміни електричних параметрів дуги під дією збурень.

Запис електричних параметрів дуги під час зварювання здійснювали вимірювальною системою, що містила персональний комп'ютер, датчики струму LA-305S/SP1 і напруги LV-25P на основі ефекту Холла, аналого-цифровий перетворювач Е-140 та персональний комп'ютер зі встановленою на нього програмою L-graph. Частота аналого-цифрового перетворення складала 10 кГц на кожен канал.

Процес зварювання плавким електродом в захисних газах можна розділити на низку подібних циклів плавлення і переносу електродного металу. Через наявність великої кількості різноманітних збурень електричні параметри кожного циклу

мають певні, часто значні, відмінності від інших. Таким чином, оцінка процесу має бути статистичною, а висновки про наявність суттєвих збурень процесу або утворення дефектів – ймовірнісними.

Попередня підготовка даних полягала у вилученні з отриманих осцилограм помилкових значень, обумовлених електромагнітними перешкодами. Такі помилкові значення поодинокі, мають значну амплітуду і трапляються доволі рідко — одне-два на 30...50 тис. вимірів. Це дозволяє замінити їх на середнє значення за вибіркою без втрати статистичної достовірності. Для того, щоб уникнути при аналізі впливу масштабного фактора оцінку процесу зварювання проводили за нормованими до діапазону  $[-1, 1]$  осцилограмами струму і напруги.

Стабільність горіння дуги на протязі зварювання шва оцінювалась за щільністю розташування точок на графіку залежності напруги від струму (рис. 1), отриманого з осцилограм струму та напруги. За стабільності процесу точки на графіку повинні чітко лягати одна на одну, утворюючи хоч лінію складної траєкторії. Однак стохастичний характер процесу перенесення електродного металу, обумовлений випадковими діями різної природи і інтенсивності, призводить до розмиття графіку. Для аналізу доцільно оцінювати перебіг процесу за період часу, що не достатній для утворення дефектів з'єднання, але не надто великий для «поглинання» впливу збурення через усереднення за вибіркою. Для шва, звареного без дії збурень, графіки (рис. 1, а–в) для інтервалів часу 10...11 с, 20...21 та 30...31 перебігу процесу мають стаціонарну стохастичну складову, тобто процес можна вважати ергодичним. Внесення збурення при зварюванні (забруднення зразків мастилом) призводить до зміни форми графіків з явним підвищенням стохастичної складової (рис. 1, г–е). За наявності збурень розкид точок не тільки збільшився, але і сам стохастичний процес стає неергодичним.

Для визначення кількісної оцінки ступеню стохастичності процесу доцільно обчислити щільність розташування точок на рис. 1 на площині «струм–напруга» (рис. 2).

Можна бачити, що таке представлення дозволяє здійснити редукцію даних. При розбитті площини «струм–напруга» на квадрати  $0,01 \times 0,01$  кількість даних для аналізу перебігу процесу на протязі 1 с зменшується в 10000 разів. Отриману таким чином матрицю цілих чисел можна аналізувати як цифрове зображення. Головним завданням обробки є знаходження ефективного представлення, яке дозволяє представити зображення в компактній формі. У сучасній теорії і практиці обробки широко застосовують вейвлет-перетворення [3–5].



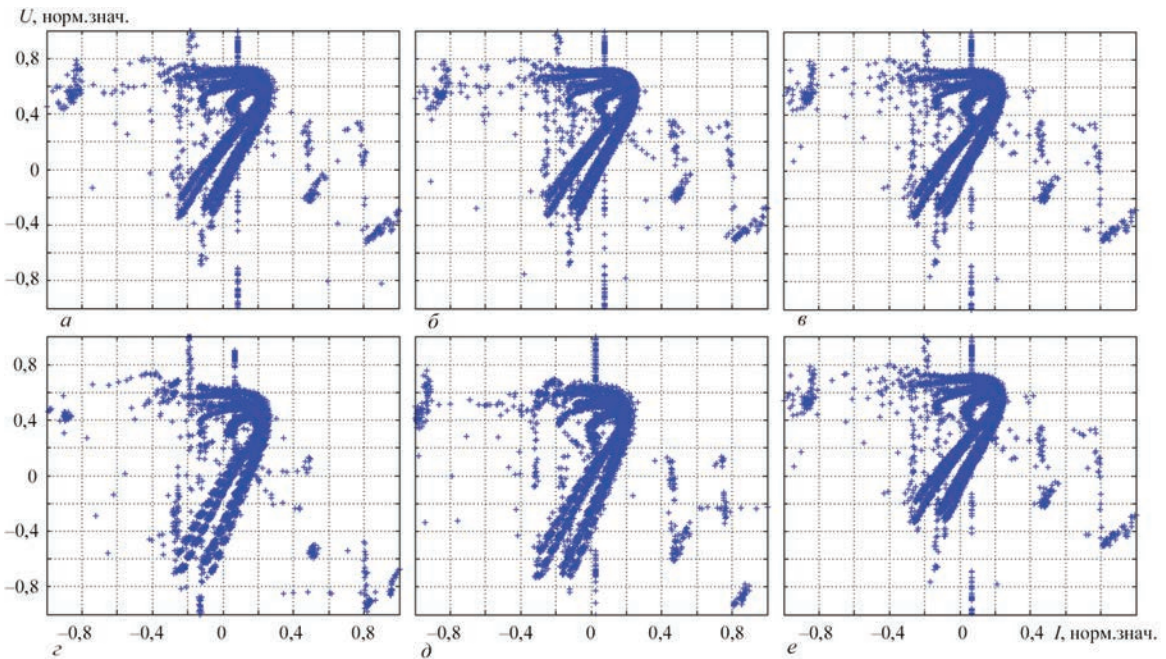


Рис. 1. Нормовані графіки «струм–напруга» процесу зварювання (описання *a–e* див. у тексті)

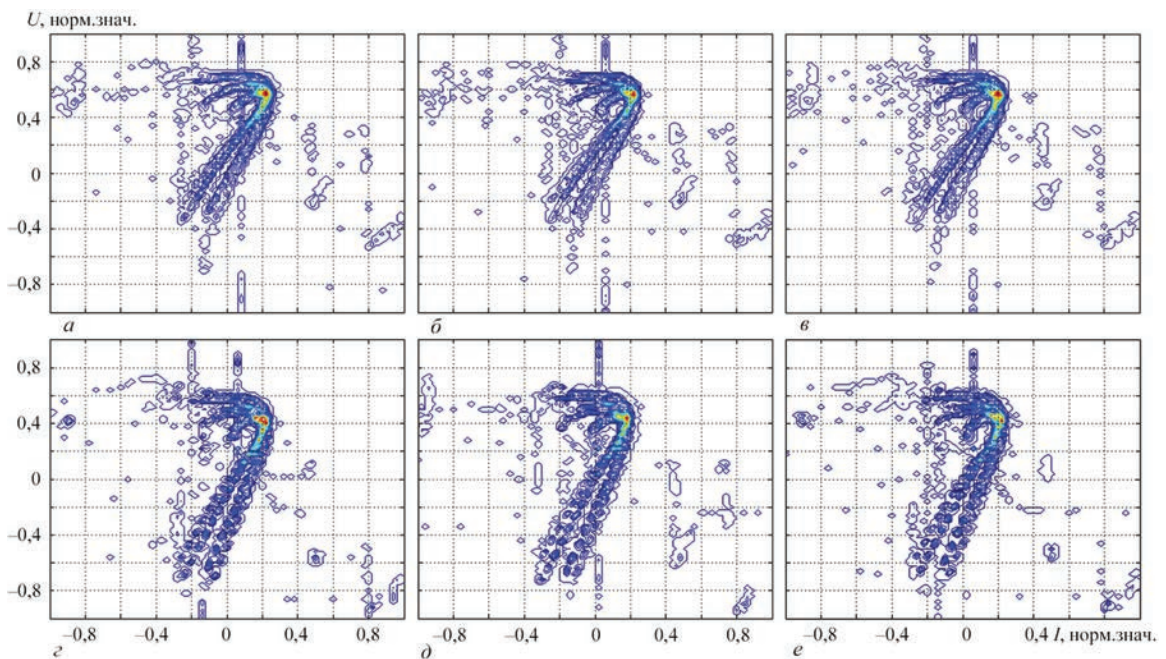


Рис. 2. Щільність розташування точок на графіках «струм–напруга» (*a–e* див. рис. 1)

На практиці найчастіше застосовують вейвлети, що визначаються як функції однієї дійсної змінної. Для аналізу зображень застосовують двовимірне дискретне вейвлет-перетворення, що ґрунтується на одновимірному вейвлет-перетворенні і не залежить від числа стовпців і рядків зображення. Тому перевагу має горизонтальний і вертикальний напрямки. Для обробки дискретних одномірних і двомірних сигналів добре зарекомендували себе вейвлети Хаара. Перетворення Хаара не потребує складних обчислень і є роздільним.

Суттєвою відмінністю задач традиційного аналізу зображень від задач, що вимагає моніторинг перебігу технологічного процесу,

**Деталізуючі коефіцієнти вейвлет-розкладання Хаара**

Деталізуючі коефіцієнти 6 рівня		Графік
-25,5787037037037	0,810185185185186	
-67,4479166666667	0,192901234567901	
-45,1976102941177	0,0574448529411765	Рис. 1, <i>г</i>
-59,2026654411765	0,0114889705882353	
-27,1956699346405	0,714869281045752	Рис. 1, <i>б</i>
-71,5788398692811	0,224673202614379	
-40,5063291139241	1,84928797468355	Рис. 1, <i>д</i>
-52,7986550632912	0	
-22,8591160220995	0,656077348066299	Рис. 1, <i>в</i>
-59,4872237569061	0,129488950276243	
-39,6990740740741	0,578703703703704	Рис. 1, <i>е</i>
-52,8549382716050	0,0385802469135803	

є потреба у оцінці рівня шумів, а не їх придушення. На практиці це означає, що необхідно оцінити значення лише деталізуючих коефіцієнтів вейвлет-перетворення.

Для матриці з розмірами 100x100 можливе розкладання Хаара до 7 рівня. Однак відмінності між набором деталізуючих коефіцієнтів починають проявлятися тільки на 6 рівні (4 коефіцієнти). Підвищення рівня до другого дозволяє виявити більше відмінностей між графіками, але і збільшує кількість коефіцієнтів для аналізу (26×26) (таблиця).

Автоматизація аналізу можлива із застосуванням методів штучного інтелекту на основі штучних нейронних мереж.

### Висновки

1. Моніторинг відповідності технологічного процесу зварювання МІГ/МАГ доцільно проводити за електричними параметрами дуги.

2. Моніторинг необхідно здійснювати за даними, що узагальнюють умови перебігу технологічного процесу за 1 с.

3. Для зменшення часу обробки інформації без її втрати доцільно проводити комплексну оцінку електричних параметрів дуги на площині «струм дуги–напруга на дузі».

4. Висновки про наявність збурень доцільно проводити за деталізуючими коефіцієнтами вейвлет-розкладання Хаара.

### Список літератури

1. Тараричкін І. О. (2002) *Статистичні методи забезпечення якості продукції зварювального виробництва*. Луганськ, СХУ ім. В. Даля.
2. Li X. R., Shao Z., Zhang Y. M., Kvidahl L. (2013) Monitoring and Control of Penetration in GTAW and Pipe Welding. *Welding Journal*, 6, 90–196.
3. Gonzalez R. C, Woods R. E. (2001) *Digital image processing*. Boston: Addison Wesley.
4. Pratt W. K. (2001) *Digital image processing*. N. Y.: Wiley Intersci.
5. Чуи Ч. (2001) *Введение в вейвлеты*. Москва, Мир.

И. А. Скачков

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сикорського».  
03056, г. Київ, пр. Перемоги, 37  
E-mail: i.skachkov@kpi.ua

### МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДУГОВОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ

В условиях роботизированной сварки важным является обеспечение непрерывного мониторинга изготовления сварной конструкции. Применительно к процессам МІГ/МАГ сварки предпочтение следует отдавать контролю за электрическими параметрами дуги, которые обобщают условия протекания технологического процесса в течение 1 с. Комплексная оценка электрических параметров может быть осуществлена на плоскости «ток дуги–напряжение на дуге». Выводы о наличии возмущений следует проводить с помощью коэффициентов вейвлет-разложения Хаара. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 2.

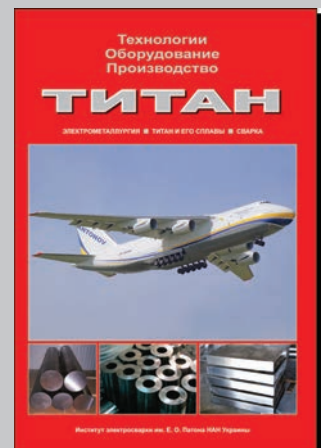
*Ключевые слова:* сварка плавящимся электродом в защитных газах, роботизация, мониторинг качества, двухмерные вейвлет-преобразования Хаара

Надійшла до редакції 25.04.2017

### НОВАЯ КНИГА

«Титан. Технологии. Оборудование. Производство». – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2017. – 254 с. Выпуск четвертый.

Сборник включает более сорока статей, опубликованных в основном в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2014–2016 гг. по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов, оборудования и материалов при производстве и сварке титана и его сплавов. Представлены обзоры по аддитивному производству и сварке титаном металлических материалов. Приведены направления деятельности НТЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины по промышленному производству слитков титановых сплавов и созданию новых сплавов на основе титана. Сборник предназначен для инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений. Предыдущие три выпуска сборника «Титан. Технологии. Оборудование. Производство», включающие статьи из журналов «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за периоды 2001–2004, 2005–2010, 2011–2013 гг. находятся в открытом доступе на сайте Издательского Дома «Патон»: [www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations](http://www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations).



Заказы на сборник просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка».