

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Пірумов Андрій Євгенович

УДК621.7.08:621.791.75

МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ЗА ЕЛЕКТРИЧНИМИ
ПАРАМЕТРАМИ ДУГИ

Спеціальність 05.03.06 – "Зварювання та споріднені процеси і технології"

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2009

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут", МОН України на кафедрі електрозварювальних установок

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент

Скачков Ігор Олегович

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", доцент кафедри електрозварювальних установок

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Коротинський Олександр Євтіхійович

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

НАН України, завідувач відділом

доктор технічних наук, професор

Кузнецов Валерій Дмитрович

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", завідувач кафедри "Відновлення деталей машин"

Захист відбудеться 21.09.2009 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.15 при Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 19, ауд. 435.

З дисертацією можна ознайомитись в науково – технічній бібліотеці ім. Г.І.Денисенка Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37

Автореферат розісланий 13.08.2009 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.002.15,
професор, д.т.н.

Головко Л.Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення високої якості зварювальних робіт є однією з найважливіших задач в галузі зварювання, значущість якої все більше зростає із підвищенням відповідальності зварних конструкцій.

Підвищення надійності конструкції визначається відповідністю матеріалів та устаткування технічним вимогам і дотримання технології зварювання з одного боку, та забезпеченням достовірного контролю якості з іншого. Відповідно до міжнародного стандарту управління якістю (ISO-9001), організація виробництва передбачає проведення моніторингу якості виробів, що виготовляються. Проведення моніторингу дозволяє вчасно реагувати на появу неякісних виробів, що призводить до значного зменшення матеріальних витрат. На сьогоднішній день відомими методами контролю якості проводять лише вибірковий контроль швів, що не завжди є виправданим через імовірність пропуску браку. Відомі методи, як руйнівного так і неруйнівного контролю якості трудомісткі, пов'язані із використанням складного обладнання, залученням спеціально підготовлених фахівців. Вартість операцій неруйнівного контролю може становити до 20 – 25 % від загальної вартості виробу, а трудомісткість контролю порівняна з трудомісткістю зварювання. На можливість застосування цих способів контролю суттєво впливає конфігурація виробу, а також спосіб зварювання.

Таким чином задачі розробки методів моніторингу якості зварного з'єднання, що не пов'язані з підвищенням трудомісткості виготовлення зварної конструкції є актуальними. Одним з перспективних напрямків створення зазначених систем моніторингу якості є використання зварювальної дуги в якості датчика процесу, який безпосередньо знаходиться в місті зварювання. Оцінка даних, які надходять з такого датчика, дозволяє робити висновки стосовно якості кожного зварного з'єднання безпосередньо після його виготовлення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Науково-дослідницька робота за темою дисертації проводилась на кафедрі електрозварювальних установок Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" МОН України у відповідності наступним науково-дослідницьким темам: НДР № ДП/232-2003 (номер держреєстрації 0100U000939) 5.4.5Б "Стабілізація і поточний контроль якості швів при дуговому підводному зварюванні трубопроводів" де дисертантом виконані роботи по розробці методів для визначення дефектних ділянок зварного шва. Дисертантом проведено аналіз можливості застосування різних систем штучного інтелекту для контролю якості дугового підводного мокрого зварювання.

Мета та задачі роботи. Метою роботи є забезпечення якості зварних з'єднань виконаних дуговим зварюванням в автоматичному режимі.

Для досягнення визначеної мети вирішували наступні задачі:

1. Визначення типових збурень процесу зварювання, що впливають на формування дефектів зварного з'єднання та контроль яких можливий за електричними параметрами дуги.

2. Визначення параметрів процесу зварювання, що є інформативними для визначення дефектів зварювання.
3. Дослідження впливу характеристик зварювального обладнання на інформативні параметри процесу.
4. Визначення методів підготовки, а також засобів для багатокритеріальної обробки даних електричних параметрів зварювальної дуги.
5. Розробка та перевірка працездатності методики моніторингу якості зварних з'єднань за електричними параметрами дуги.

Об'єкт дослідження – процес дугового зварювання в CO₂ та дугового підводного мокрого зварювання.

Предмет дослідження – процеси в системі "дуга – джерело живлення", що впливають на якісні характеристики формування зварного з'єднання, методики та алгоритми моніторингу якості зварних з'єднань за електричними параметрами дуги.

Методи дослідження. Для вирішення задач поставлених в дисертації використовували методи математичної статистики та імовірнісні методи із використанням систем штучного інтелекту. В роботі застосовувалися методи математичного моделювання (комп'ютерної імітації) процесів в системі джерело живлення – дуга. Для перевірки достовірності теоретичних висновків використовували експериментальні методи.

Наукова новизна отриманих результатів.

Встановлено, що для прогнозування наявності дефектів формування зварного з'єднання із точністю не нижче 85 %, необхідно використовувати узагальнюючу статистичну оцінку наступних параметрів режиму дугового зварювання, а саме: середніх значень, дисперсій та часових параметрів, що характеризують перенос електродного матеріалу.

Вперше, на основі аналізу часових параметрів переносу матеріалу електродного дроту, побудовано стохастичну динамічну математичну модель (комп'ютерну імітацію) системи "джерело живлення – дуга – виріб" процесу дугового зварювання плавким електродом з урахуванням особливостей переносу електродного металу, яка дає можливість визначати вплив електричних параметрів дугового зварювання та характеристик джерела живлення на інформативні параметри процесу зварювання та генерувати данні для навчання штучних нейронних мереж.

Розроблено нову методику моніторингу якості зварних з'єднань, що ґрунтується на одночасному використанні статистичного аналізу та аналізу системами штучного інтелекту сукупності параметрів, які характеризують процес утворення зварного з'єднання.

Практичне значення наукових результатів.

Розроблено структуру та алгоритм роботи системи моніторингу за електричними параметрами дуги, яка дозволяє проводити безперервний моніторинг якості зварних з'єднань, в тому числі в режимі реального часу, на предмет виявлення дефектів формування шву.

Розроблено інформаційно-вимірювальну систему для збору даних по електричних параметрах дуги, формування послідовностей для обробки ШНМ та проведення статистичного аналізу даних згідно алгоритму моніторингу якості.

Розроблено алгоритм підготовки даних і методику навчання штучних нейронних мереж для застосування в системі моніторингу якості процесу дугового зварювання за електричними параметрами дуги.

Розроблено спосіб формування навчальних послідовностей за допомогою стохастичної математичної моделі (комп'ютерної імітації) дугового зварювання з короткими замиканнями, що враховує статичні та динамічні властивості джерела живлення, і дозволяє значно зменшити кількість експериментів які необхідні для визначення параметрів системи моніторингу якості при зміні характеристик зварювального обладнання.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно поставлені задачі та намічені шляхи їх вирішення, проведені теоретичні та експериментальні дослідження, узагальнені результати, розроблені рекомендації по використанню та зроблені висновки.

В друкованих працях, що опубліковано у співавторстві, особисто здобувачеві належить: в [1,4,5] – розроблена методика проведення досліджень для підводного мокрого зварювання, визначена можливість використання електричних параметрів дуги для контролю якості зварних з'єднань, проведено навчання нейронних мереж LVQ та карти Кохонена, розроблено структуру та проведено навчання гібридних мереж для використання при підводному зварюванні, виконано порівняльний аналіз працездатності використаних мереж; в [2] – проведено вибір структури і навчання нейронної мережі Елмана та гібридної системи (системи нечіткої логіки з правилами, що створені за допомогою нейронних мереж) для випадку підводного дугового мокрого зварювання, перевірено точність виявлення деяких технологічних збурень; в [3] – розробка та реалізація обчислювальних блоків інформаційно-вимірювальної системи, програмування системи; в [6] – визначено ряд інформативних характеристик для створення системи моніторингу якості зварного з'єднання при зварюванні в CO_2 ; в [7] – проведена розробка та навчання нейронної мережі Елмана для застосування її при зварюванні в CO_2 , проведено перевірку точності роботи при виявленні штучних збурень.

Апробація роботи. Основні положення і результати роботи доповідались та обговорювались на третій міжнародній конференції „Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах”, м. Київ, 2006 р.; третій та четвертій Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології”, Київ 2005, 2007 р.р.; міжнародній науково-технічній конференції “Досконалість зварювання - комплексний підхід” (Київ, НТУУ “КПІ”, 2007р); наукових семінарах кафедри електрозварювальних установок НТУУ „КПІ” 2004-2007 р.р.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи видано 7 робіт, з них 3 в провідних наукових фахових виданнях та 4 в збірниках тез доповідей науково – технічних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 135 сторінках, у тому числі 119 сторінок основного тексту, 73 рисунки та 14 таблиць, список літератури з 115 найменувань та 3 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика дисертаційної роботи, обґрунтована актуальність її теми, сформульована мета і основні задачі досліджень. Висвітлена наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведені відомості про особистий внесок дисертанта і апробації результатів роботи.

У першому розділі проведено загальний аналіз існуючих традиційних методів неруйнівного контролю якості зварних з'єднань, а також методів, що використовують аналіз електричних параметрів дуги. Зроблено висновок про необхідність використання штучних нейронних мереж для моніторингу якості зварних з'єднань. Сформульовані завдання досліджень.

Відзначено, що перевірка якості існуючими методами кожного з'єднання не завжди є можливою через достатньо складний процес контролю, його вартість, особливості конструкцій та ін. В цьому сенсі актуальним є розробка методик моніторингу якості всієї партії виробів.

Встановлено, що при дуговому зварюванні поява тих чи інших збурень відбивається на зміні електричних параметрів дуги, що робить можливим визначення якісних характеристик шва шляхом оцінки значущості та тривалості цих збурень. На сьогоднішній час існує можливість визначення дефектів зварних з'єднань за електричними параметрами дуги, що не пов'язані із металургійними та термічними явищами, які проходять в зварювальній ванні та зоні термічного впливу під час кристалізації металу шва та охолодженні зварного з'єднання.

Показано, що зварювальний процес є багатомірною зв'язною системою. Тому є необхідність в розвитку моделювання для ефективного керування процесом зварювання та уникнення великої кількості експериментів при дослідницьких роботах.

Існує декілька видів моделей. Одні основані на металургії та фізиці процесу зварювання – детерміновані. Вони потребують набору знань експертів. Інші моделі є стохастичними, і побудовані на основі статистичного аналізу набору експериментальних даних. Використання детермінованих моделей зварювальної дуги дозволяє аналізувати фізичні явища процесу, але створення такої моделі вимагає врахування багатьох явищ, що відбуваються, при протіканні процесу дугового зварювання.

В зварюванні проводиться оцінка, що використовує статистичні методи управління якістю. Особливо це стосується перевірки конструкції після її виготовлення, при прийманні. Використання статистичних методів управління якістю продукції направлене на вдосконалення системи контролю та його організації. Статистичні ме-

тоди не замінюють інші методи та засоби контролю, але можуть значною мірою підвищити їх ефективність, достовірність та економічність.

Через складність системи і велику кількість пов'язаних параметрів, побудова систем моніторингу на основі аналізу цих параметрів є ресурсоємкою задачею. Підвищення продуктивності контролю якості з'єднань потребує вирішення цієї задачі за малий проміжок часу. Проведено аналіз існуючих методів обробки даних, встановлено, що для створення системи моніторингу якості зварних з'єднань доцільно використовувати системи штучного інтелекту на базі нейронних мереж, які толерантні до помилок, здатні вирішувати задачі класифікації та кластеризації даних та здатні до узагальнення висновків.

Оскільки електрична дуга має природну нелінійність незалежно від способу дугового зварювання. Суттєві нелінійні характеристики має також виріб що зварюється, через те що теплофізичні та електричні властивості залежать від його температури. Виходячи з цього обрана мережа повинна вирішувати нелінійні задачі, тобто мати в своїй структурі нелінійні активаційні функції.

Проведено аналіз існуючих штучних нейронних мереж і виявлено, що для вирішення поставленої задачі доцільно застосовувати самоорганізаційні мережі Кохонена, карти Кохонена та мережі LVQ (Learning Vector Quantization – розділення навчальних векторів), а також мережі Елмана, які належать до рекурентних мереж.

Загальна структура побудови систем на базі штучних нейронних мереж (НМ) складається з трьох основних етапів: вибір структури НМ, навчання, використання НМ.

Алгоритм процесу навчання нейронної мережі схематично зображено на рис. 0.

На вхід нейронної мережі слід подавати дані, що корелюються із станом зварювальної ванни та процесом переносу електродного матеріалу. Відповідно, необхідно на основі вивчення системи "джерело живлення – дуга - ванна" визначити стохастичні ха-

Рис. 1 – Загальний алгоритм навчання штучних нейронних мереж

рактеристики електричних параметрів дуги, що пов'язані з процесом формування зварного з'єднання.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено дослідженню впливу збурень, що відбиваються на формуванні дефектів зварного з'єднання, на електричні параметри дуги, визначенню та розрахунку інформативних характеристик процесів

дугового зварювання, а також навчання штучних нейронних мереж для визначення технологічних збурень процесу.

При розробці методики контролю якості проводили експериментальні зварювання для двох випадків дугового зварювання, а саме: автоматичного дугового зварювання у вуглецевому газі та автоматичного дугового підводного мокрого зварювання. Зазначені способи зварювання суттєво відрізняються за параметрами та умовами протікання процесу, що дозволяє узагальнити розроблену методику.

Обидва способи зварювання потребують жорсткої вольт-амперної характеристики джерела живлення і постійної швидкості подачі електродного дроту. Тому структура установок є подібною, а різниця в обладнанні викликана особливостями середовища в якому відбувається зварювання.

Експерименти проводили на зразках з низьковуглецевої сталі, в конструкцію яких вносили ряд типових технологічних збурень (перевищення крайок деталей, зміна вильоту електроду, ступінчаста зміна зазору, поступова зміна зазору, емуляція відхилення дуги від стику деталей, забруднення деталей), що можуть призводити до появи дефектів зварного з'єднання.

Підготовка зразків велась виходячи з рекомендацій стандарту ГОСТ 14771-76 на підготовку деталей під з'єднання. Так для зварювання в CO_2 (для товщини деталей 2 мм) допускається використання зазору між деталями $0^{+1,0}$ мм, а перевищення кромки деталей при збиранні не більше 0,4 мм при товщині деталей до 4 мм. В свою чергу для товщини деталей 10 мм, можливе перевищення кромки складає 1,5 мм, а значення зазору становлять 2_{-2}^{+1} мм. Виходячи з цього, зразки мали відхилення, що не перевищували допустимі відхилення на 1 мм для збурень по перевищенню кромки деталей, та 0,5 мм для збурень по зміні зазору.

Визначені основні інформативні характеристики для створення системи моніторингу якості, як для дугового зварювання у вуглецевому газі так і підводного мокрого зварювання. Встановлено, що для обох зазначених способів зварювання такими є вибіркове середнє значення електричних параметрів дуги (струм зварювання та напруга на дузі) яке відображає міру відхилення від заданого режиму зварювання, вибіркєва дисперсія цих параметрів, що характеризує стабільність електричного параметру протягом певного часу та параметр, що характеризує перенос електродного матеріалу.

Так процес зварювання в CO_2 характеризується крупнокрапельним переносом електродного матеріалу із короткими замиканнями дугового проміжку. Таким чином, параметром що характеризує стабільність переносу, а отже і стабільність зварювання, є тривалість коротких замикань, середнє значення якої за проміжок часу повинно бути майже однакове.

Підводне мокре зварювання, на відміну від зварювання в CO_2 , характеризується крупнокрапельним переносом електродного матеріалу із випадковими короткими замиканнями дугового проміжку. Відзначимо, що параметром який характеризує

стабільність процесу в даному випадку є щільність коротких замикань, тобто кількість коротких замикань за проміжок часу.

Потрапляння крапель розплавленого металу та зміна тиску дуги призводить до появи коливань зварювальної ванни, що призводить до поступового переходу металу у вигляді хвиль в хвостову частину ванни. При переміщенні дуги вздовж зварного шва, кожна нова хвиля розплавленого металу потрапляє на метал, що вже майже закристалізувався, це призводить до появи лусок на поверхні зварного шву. Таким чином, вважаючи, що розвиток дефекту формування можливий під час кристалізації хвилі розплавленого металу, довжину ділянки для контролю якості визначали шляхом підрахунку кількості лусок на 10 мм шву в різних його місцях. Також з літературних джерел відомо, що короткочасні імпульсні збурення тривалістю менше 0,1 с не викликають формування дефектів. Після чого розраховували зазначені вище інформативні характеристики процесу для кожної ділянки. Загальна матриця даних для оцінки та навчання складалася з 5 змінних (середні значення та дисперсії струму зварювання та напруги на дузі, а також, в залежності від виду зварювання, середньої тривалості коротких замикань, для зварювання в CO₂, чи щільності к.з. для підводного мокрого зварювання), довжина векторів відповідала кількості ділянок тривалістю по 0,1 с.

Встановлено, що такий підхід формування даних є оптимальним при побудові та навчанні нейронних мереж, оскільки при цьому відбувається багатокритеріальна оцінка основних параметрів, що відображають хід процесу зварювання.

Для ліквідації впливу на інформативні параметри масштабного фактору та випадкових виплесків, перед розрахунком даних по дисперсії, середнього значення та тривалості (щільності) коротких замикань, для отримання кінцевих значень для вказаних параметрів проводили нормалізацію за виразом (1).

$$A_i = \frac{N_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n N_i}{6 \cdot \sigma} + \frac{1}{2} \quad (1)$$

де A – нормалізоване значення параметру, N – значення до нормалізації, σ – стандартне відхилення параметру.

Для розрахунку середніх значень, дисперсії, та тривалості (щільності) коротких замикань, проведення нормалізації цих параметрів, а також формування вихідної матриці цих значень, яка придатна для обробки нейронною мережею було розроблено ряд функцій (fuzzydata, normal2), що працюють в середовищі MatLab 7.0.

Для створення системи контролю якості застосовували нейронні мережі: карту Кохонена із впорядкованим розташуванням нейронів, мережу LVQ, а також нейронну мережу Елмана та гібридні нейронні мережі. Вказані НМ призначені для вирішення задач класифікації і кластеризації та прогнозування. Використання зазначених мереж пов'язано із необхідністю визначення їх якісних характеристик (точність роботи, швидкодія, ресурсоемність).

Нейронні мережі карта Кохонена та LVQ містили 2 нейрони в конкуруючому шарі, оскільки проводили класифікацію за принципом якісна – неякісна ділянка шву.

Нейронна мережа Елмана, яку використовували в роботі, містила 30 нейронів у першому шарі, 15 у другому та 1 у третьому (вихідному) шарі. Кількість нейронів в першому та другому шарах визначали експериментально з урахуванням точності роботи мережі. При цьому функціями активації першого та другого шарів був гіперболічний тангенс, а вихідний шар мав лінійну функцію активації. Обидві функції найчастіше застосовують при використанні мережі Елмана.

Структура гібридних мереж, що застосовували при створенні системи моніторингу якості, була наступною: кількість входів – 1, оскільки на вхід подавали результат роботи нейронної мережі Елмана; кількість виходів – 1. Використовували функцію активації Гауса (gauss2mf). Використання великої кількості вхідних даних призводило до значних витрат часу при проведенні їх аналізу, що є значним недоліком в роботі зазначеної системи.

Для навчання мереж в даній роботі використовували навчання "з вчителем" для мереж LVQ та Елмана та "без вчителя" при навчанні карти Кохонена.

Створення та навчання нейронних мереж проводили за допомогою пакетів Neural Network Toolbox v4.0.3, FuzzyLogic Toolbox v2.1.3, що входять до складу MatLab 7.0.

Нейронні мережі LVQ та карта Кохонена навчалася протягом 2000 циклів, крок навчання мережі LVQ складав 0,001. Для випадку застосування нейронної мережі Елмана навчання відбувалося протягом 1000 циклів із кроком 0,001, в результаті чого похибка навчання не перевищувала 10 %. Дані для навчання і перевірки працездатності системи формувалися з даних від різних серій експериментів.

Розробка системи моніторингу якості із застосуванням штучних нейронних мереж передбачає проведення великої кількості експериментів. Це пов'язано із необхідністю визначення впливу режимів зварювання, обладнання та інших факторів на інформативні характеристики процесу зварювання. Тому дослідження впливу цих факторів доцільно проводити із використанням математичних моделей дугового зварювання.

У третьому розділі проведено розробку стохастичної математичної моделі (комп'ютерної імітації) процесу дугового зварювання із короткими замиканнями, яка дозволяє визначати вплив параметрів зварювання та властивостей джерела живлення на інформативні параметри моніторингу якості за електричними параметрами дуги, а також формувати навчальні послідовності для штучних нейронних мереж. Проаналізовано результати визначення штучними нейронними мережами технологічних збурень процесу зварювання. Визначено причини та можливість їх визначення за електричними параметрами дуги, що впливають на утворення дефектів зварних з'єднань.

Кожен з визначених інформативних параметрів залежить як від параметрів процесу зварювання (струм зварювання, напруга на дузі, виліт електроду), так і від характеристик обладнання, зокрема джерела зварювального струм (статична вольт-

амперна характеристика джерела живлення, швидкість наростання струму під час короткого замикання).

Оцінити вплив статичних і динамічних властивостей джерела живлення та параметрів режиму зварювання на параметри розподілу імовірнісних характеристик можливо за допомогою розробленої стохастичної математичної моделі (комп'ютерної імітації), що враховує залежності частоти та шпаруватості коротких замикань від струму зварювання.

Модель побудована із використанням пакету MatLab 7.0 та пакету графічного моделювання лінійних та нелінійних динамічних систем Simulink 6.0 (рис. 2). Вона складається з трьох основних блоків: „мережа живлення”, „зварювальне джерело живлення”, „дуга”.

Блок „мережа живлення” є стандартним блоком, що входить до набору бібліотек Simulink 6.0.

Рис. 2 – Загальний вигляд моделі дугового зварювання плавким електродом у вуглецевому газі

Джерело живлення являє собою математичну модель трифазного випрямляча, що характеризується вольт–амперною характеристикою (жорсткою із нахилом 0,04 В/А в даному випадку), швидкістю наростання струму зварювання, напругою неробочого ходу (рис. 3). Модель дозволяє змінювати зазначені параметри в широкіх межах.

Робота блоку „Дуга” (рис. 2) основана на статистичній оцінці емпіричних даних отриманих шляхом дослідження зварювання в CO_2 на різних режимах.

а)

б)

а) – статична ВАХ модельованого джерела живлення;

б) – швидкість наростання струму в момент короткого замикання

Рис. 3 – характеристики модельованого джерела живлення

Струм в режимі горіння дуги формується за допомогою змінного активного опору R , опір якого визначається статичною вольт–амперною характеристикою дуги та вильотом електрода. Статичну ВАХ дуги отримували шляхом проведення ряду експериментальних зварювань. При яких для постійної швидкості подавання елект-

родного дроту змінювали вольт-амперну характеристику джерела живлення, фіксуючи при цьому значення струму та напруги на клеммах джерела живлення.

Блок "Моделювання переносу матеріалу електродного дроту" побудовано на основі використання експериментальних залежностей за якими визначені основні часові параметри та їх відхилення процесу переносу електродного матеріалу із короткими замиканнями, а саме: частота, шпаруватість к.з. (рис. 5) та їх дисперсії (рис. 6).

Встановлено, що тривалість коротких замикань залежить від режиму зварювання і розподіляється за визначеним законом розподілу випадкової величини (рис. 4). Закон розподілу визначали за допомогою оцінки максимальної різниці між теоретичною та емпіричною функціями розподілу (критерій Колмогорова).

Рис. 4 – Моделювання зварювальної дуги стандартними блоками Simulink

а) б)
діаметр дроту: –●– – 0,8 мм; –○– – 1,0 мм; –▲– – 1,2 мм; –■– – 1,6 мм (50 кА/с)
–*– – 0,8 мм (32 кА/с)

Рис. 5 – Залежність частоти (а) та шпаруватості (б) к.з. від струму зварювання

Аналіз гістограм розподілів тривалості коротких замикань окремо показує, що найчастіше к.з. розподіляються наступним чином: випадкові к.з. – за розподілом Вейбула, к.з. із переходом розплавленого металу – за логарифмічно нормальним розподілом випадкової величини. Ці данні враховували при побудові математичної моделі.

Адекватність розробленої моделі перевіряли шляхом порівняння статистичних даних основних параметрів зварювання: середнє значення струму зварювання та напруги на дузі, їх середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт варіації, середнє значення тривалості коротких замикань, середньоквадратичне відхилення тривалості к.з., шпаруватість к.з. Крім того, проводили двовибірковий F-тест (критерій Фішера) для дисперсії та парний двовибірковий t-тест (критерій Стюдента) для середніх значень електричних параметрів отриманих в результаті моделювання та експериментальних значень.

а) б)
діаметр дроту: –●– – 0,8 мм; –○– – 1,0 мм; –▲– – 1,2 мм; –■– – 1,6 мм (50 кА/с)
Рис. 6 – Залежність дисперсії частоти (а) та шпаруватості к.з. (б) від струму зварювання

Аналіз результатів роботи системи із використанням штучних мереж LVQ і карти Кохонена, для оцінки коливань дисперсії струму зварювання при підводному зварюванні показує успішне виявлення трьох з чотирьох штучно введених дефектів складання – перевищення кромки, зміна вильоту електрода, наявність прихваток. Найменш чутливою запропонована методика визначення якості виявилась до ступінчастої зміни зазору між кромками деталей.

Таким чином, точність виявлення дефектів (табл.1) за оцінкою зміни дисперсії зварювального струму із використанням штучних мереж LVQ і карта Кохонена в середньому склала 41,3 % та 16,8 % відповідно. Точність виявлення дефектів визначали шляхом підрахунку кількості блоків (ділянки осцилограми тривалістю 0,1 с), які система класифікувала вірно по відношенню до результатів візуального огляду.

Відмічена незадовільність точності визначення дефектів нейронною мережею із застосуванням тільки дисперсії зварювального струму.

Використання одночасно семи характеристик (для випадку підводного мокрого дугового зварювання) з оцінкою їх за допомогою динамічної нейронної мережі Елмана із зворотними зв'язками та подальшою обробкою із використання гібридних систем дозволило значно зменшити похибку визначення якості. При цьому середнє значення похибки склало 9 % (табл.2), результат підтверджено актом випробувань. Система однаково успішно справлялася із виявленням дефектів, що виникали в результаті дії штучних збурень – зміна зазору та вильоту, при цьому глибина занурення не впливала на точність роботи системи.

Таблиця 1 – Похибка нейронних мереж при ідентифікації дефектів (підводне мокре зварювання)

Тип збурення	Загальна кількість блоків	Помилка роботи мережі, %	
		карта Кохонена	LVQ
Перевищення кромки	70	15,7	18,6
Зміна вильоту	60	13,3	13,3
Наявність прихваток	60	16,6	50
Зміна зазору	60	21,6	83,3

Для випадку автоматичного зварювання у вуглецевому газі використовували оцінку інформативних параметрів із застосуванням нейронної мережі Елмана. На відміну від підводного мокрого зварювання, замість щільності коротких замикань використовували середню тривалість к.з. за інтервал часу. Система успішно справлялася із виявленням дефектів викликаних дією штучних збурень, а саме миттєвою зміною зазору, повільною зміною зазору, перевищення кромки, зміна вильоту, відхилення електрода від осі стику. При цьому середня похибка складала 7 %. Аналіз проводили із використанням п'яти характеристик. Власними дослідженнями підтверджені

Рис. 7 – Типова гістограма розподілу тривалості к.з. при зварюванні в CO₂

но, що використання середнього значення та дисперсії потужності дуги не впливає на точність роботи нейронних мереж.

Таблиця 2 – Похибка мережі Елмана при ідентифікації дефектів викликаних штучними збуреннями (підводне мокре зварювання)

Тип збурення	Загальна кількість блоків	Помилка роботи системи, %
Зміна зазору (глибина занурення 0,3 м)	236	6
Зміна зазору (глибина занурення 10 м)	190	10
Зміна зазору (довгий зазор глибина занурення 10 м)	236	8
Зміна вильоту (глибина занурення 10 м)	240	12

Таким чином, використання нейронних мереж Елмана та інформативних параметрів, що враховують перенос електродного матеріалу, має найменшу помилку визначення збурень і може використовуватись в системі моніторингу дугового зварювання.

Відзначено, що велика кількість додаткових збурюючих факторів при зварюванні під водою суттєво погіршує точність виявлення відхилень нейронними мережами в порівнянні із зварюванням у вуглецевому газі.

Проведено аналіз чинників, що впливають на утворення дефектів формування зварного шва, а саме пропалів та непроварів, підрізів та несплавлень, напливів та металургійних дефектів (тріщини, пори, шлакові включення).

Встановлено, що на появу непроварів (пропалів) здійснюють вплив три групи параметрів: підготовка з'єднання під зварювання, параметри зварювання та відхилення дуги від осі стику (рис. 4). Відзначимо, що непровари та пропали є дефектами на виникнення яких впливають однакові типи збурень, однак якщо непровари змен-

шують перетин шва та викликають значну концентрацію напружень, пропали є взагалі неприпустимими дефектами зварного з'єднання. Із використанням цифрової обробки електричних параметрів (струму зварювання та напруги на дузі) із використанням штучних нейронних мереж, можливо визначати дію таких збурень, як: невідповідність техноло-

Рис. 8 – Збурення що викликають появу непроварів та пропалів зварного з'єднання

гічним умовам зазору між кромками деталей, нестабільність вильоту електрода, стабільність процесу зварювання. Визначення відповідності швидкості зварювання та

енергетичних параметрів процесу технологічним умовам, можливе завдяки статистичній оцінці цих параметрів.

Зони несплавлення характеризує утворення зазору між оплавленим основним металом та металом шва. Зони несплавлення утворюються (рис. 4) коли процес зварювання виконують на форсованих режимах і підвищеній швидкості зварювання. Невірно підібрані режими зварювання в купі із відхиленням дуги від стику призводять до більш глибокого проплавлення однієї з кромek і як наслідок – утворення підрізів чи несплавлень. На утворення підрізів та несплавлень впливають форма і кут нахилу електроду. Це відбувається завдяки більш інтенсивному переміщенню металу в хвостову частину ванни через збільшений тиск дуги.

Рис. 9 – Збурення, що викликають появу підрізів та несплавлень

Використання зварювальної дуги в якості датчика для визначення наявності дефектів зварного з'єднання, дозволяє визначати такі збурення: велике відхилення дуги від стику – за рахунок ШНМ, а також невідповідність параметрів зварювання технології зварювання.

рювання.

Напливи пов'язані із натіканням металу зварювальної ванни на холодний основний метал. Метал, що натік несплавляється із основним. Причиною утворення напливу (рис. 4) є порушення енергетичних параметрів режиму зварювання, швидкість зварювання, кут нахилу електроду, надмірне відхилення зварювальної дуги від осі стику або наявність на поверхнях, що зварюються шару оксидів. Прогнозування появи напливів можливе завдяки визначенню невідповідності параметрів зварювання вимогам – методами статистичної обробки, та наявності великого відхилення дуги при використанні штучних нейронних мереж.

Рис. 10 – Збурення, що можуть викликати появу напливів

Під дією металургійних та термічних факторів можлива поява кристалізаційних та холодних тріщин, пор та сторонніх включень. Але врахування металургійних та термічних явищ є вкрай важким, що призводить до практичної неможливості визначення металургійних дефектів за електричними параметрами дуги.

можливості визначення металургійних дефектів за електричними параметрами дуги.

У четвертому розділі розглянуті питання реалізації та застосування розробленої методики моніторингу якості з'єднань та проведено перевірку її працездатності.

Запропоновано алгоритм моніторингу якості дугового зварювання, згідно якому моніторинг якості здійснюють в три етапи:

– розрахунок середньоквадратичного значення струму зварювання та напруги на дузі з метою визначення відповідності режиму зварювання заданому;

– статистична оцінка осцилограм струму та напруги зварювання, яка включає розрахунок середньоквадратичних значень цих параметрів та їх відхилень. Визначення місць виходу розрахункових величин за встановленні межі з метою визначення дефектів;

– оцінка штучними нейронними мережами із подальшою вейвлет-фільтрацією, для визначення збурень, що призводять до появи дефектів.

Відзначено, що при створенні автоматизованих систем моніторингу якості зварних з'єднань, відомості про наявність та розташування виявлених відхилень, що могли призвести до появи дефектів система має заносити до паспорту на виріб, а також виводить на пристрій індикації графічне відображення шву із визначеними дефектами.

Розроблено "Контрольний лист" для проведення атестації з'єднання. До нього заносяться (автоматично чи вручну) всі відхилення, що мали місце при зварюванні виробу.

У „контрольний лист” окрім загальних розрахункових параметрів вносяться, у випадку виявлення відхилень, номери блоків даних (ділянка осцилограми певної тривалості), або, у випадку відсутності відхилень, заноситься знак „+”. Загальний висновок – результати оцінки на кожному етапі алгоритму. У випадку часткового неспівпадіння результатів оцінки статистичних параметрів (неспівпадіння тривалості однієї і тієї ж ділянки шва), та результатів отриманих за допомогою штучних нейронних мереж, перевага надається результатам оцінки отриманої за рахунок штучних НМ.

Перевірку розробленої методики прогнозування зварних з'єднань, виконаних дуговим зварюванням проводили на зразках, що збирали згідно ГОСТ 14771-76 для зварювання у вуглецевому газі (УП), тип з'єднання С2. Системою контролювали відхилення параметрів форми з'єднання за електричними параметрами дуги. Перевірку проводили згідно розробленого алгоритма. Дані по кожному етапу перевірки заносили до "контрольного листа".

В тестові експериментальні зразки вносили штучні збурення, що можуть призводити до появи дефектів формування шва. Згідно з результатами оцінки якості було оформлено відповідну кількість „контрольних листів”.

Використання комплексного оцінювання якості дозволяє виявляти дефекти геометрії зварного з'єднання із похибкою що не перевищує 7 % для зварювання у вуглецевому газі.

Розробка методів автоматичного контролю та моніторингу якості створює передумови для розширення можливостей по вдосконаленню систем автоматичного керування зварювальними процесами. Використання розробленої методики дозволить впливати на параметри дугового процесу не тільки за рахунок вимірювання їх поточних значень, а і за рахунок інформації про прогнозовану якість зварного з'єднання. Запропоновано функціональну схему установки для автоматичного керування процесом дугового зварювання, проведено аналіз можливостей сучасної обчислювальної техніки для вирішення завдань по контролю та керуванню якістю дугового зварювання в режимі реального часу.

Проведено аналіз можливостей сучасної обчислювальної техніки для створення систем моніторингу якості та автоматичного керування зварюванням із зворотнім зв'язком за якістю з'єднання.

Розроблено інформаційно-вимірювальну систему в якій реалізована можливість статистичної оцінки якості зварних з'єднань, що відповідає першому етапу моніторингу якості за представленим алгоритмом.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне завдання по забезпеченню якості зварних з'єднань виконаних дуговим зварюванням в автоматичному режимі за електричними параметрами дуги.

1. Встановлено, що за електричними параметрами дуги можливо визначати дефекти формування зварних з'єднань, поява яких пов'язана із переміщеннями ванни розплавленого металу. Переміщення ванни пов'язане зі зміною умов горіння зварювальної дуги, що в свою чергу напряму залежить від електричних параметрів зварювання. Такими дефектами є: неповари, пропали, напливи, кратери, підрізи.

2. Встановлено, що моніторинг якості дугового зварювання необхідно здійснювати шляхом аналізу змін в часі статистичних характеристик: вибіркового середнього значення та дисперсії струму зварювання та напруги на дузі, середнього значення тривалості коротких замикань для випадку дугового зварювання у вуглецевому газі та щільності к.з. для дугового підводного мокрого зварювання.

3. Підтверджено, що оптимальною тривалістю ділянки осцилограми для аналізу є час 0,1 с, оскільки це є мінімальний час за який можливо утворення дефекту зварного з'єднання при дії того чи іншого збурення.

4. В результаті проведених досліджень встановлено, що інформативні характеристики процесу моніторингу якості носять нелінійний, розривний характер, що обумовлює використання нелінійних штучних нейронних мереж із зворотними динамічними зв'язками.

5. Встановлена необхідність в попередній підготовці даних для аналізу за допомогою нейронних мереж для уникнення масштабного фактору та усунення можливої дії випадкових виплесків електричних параметрів. Методика підготовки даних передбачає розрахунок інформативних характеристик по ділянках осцилограми із подальшою їх нормалізацію за правилом 3 у.

6. Визначено, що при побудові системи моніторингу якості слід враховувати вплив характеристик обладнання та параметрів режиму на інформативні пара-

метри процесу зварювання. Зокрема швидкість наростання зварювального струму в момент к.з., яка визначається індуктивністю джерела живлення, суттєво впливає на вибірккову дисперсію струму та напруги зварювання, що обумовлює необхідність корегування значень граничних відхилень системи моніторингу.

7. Розроблена математична стохастична модель (комп'ютерна імітація) дугового зварювання з короткими замиканнями, за допомогою якої, на основі отриманих залежностей, яка дозволяє здійснювати навчання нейронних мереж. Модель дозволяє оцінити вплив характеристик обладнання, а саме статичних вольт-амперних характеристик та швидкості наростання струму в момент короткого замикання джерела живлення, а також параметрів режиму зварювання на інформативні параметри.

8. Встановлено, що моніторинг якості дугового зварювання слід проводити в три етапи, що дозволяє враховувати при аналізі параметри режиму зварювання та їх стабільність із використанням статистичного аналізу, а також визначати моменти дії критичних збурень із використанням штучних нейронних мереж.

9. Визначено, що завдяки аналізу інформативних параметрів процесу дугового зварювання із застосуванням ШНМ, можливо визначати дефекти формування зварного шва з похибкою, що не перевищує 15 % для підводного дугового мокрого зварювання, та 10 % для зварювання в вуглекислому газі.

10. Розроблена інформаційно-вимірювальна система, яка дозволяє проводити запис даних електричних параметрів дуги та моніторинг якості з'єднання (за статистичними характеристиками), що є одним з етапів розробленого алгоритму моніторингу якості.

11. Визначено, що на теперішній час на базі запропонованого алгоритму можливо реалізувати лише систему моніторингу якості, оскільки на обробку блоку даних тривалістю 0,1 с необхідний час 0,03 с. Автоматичне керування зварюванням можливе у випадку, коли час на проведення аналізу і формування керуючої дії не буде перевищувати 1% даних для оцінювання або 0,001 с.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. 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.

2. Контроль якості підводного дугового мокрого зварювання за електричними параметрами дуги / А.Є. Пірумов, І.О. Скачков, С.Ю. Максимов, // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2006. – №2. – С. 76 – 81.

3. Специализированная информационно-измерительная система для мониторинга процесса сварки / А.Е. Пирумов, И.О. Скачков, С.Ю. Максимов, С.А. Супрун // Автоматическая сварка. – 2007. – №8. – С. 41 – 43.

4. Application of Artificial Intelligence Systems for Control of Quality of Underwater Welded Joints / I.O. Skachkov, A.E. Pirumov, S.Yu. Maksimov, E.A. Prilipko // Computer Technology in Welding and Manufacturing (16th International Conference) & Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes (3rd International Conference): Abstracts of Papers. – K.: E.O. Paton EWI. – 2006. – p.73.

5. Использование системы контроля качества при подводной сварке / А.Е. Пирумов, И.О. Скачков // III Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів "Зварювання та суміжні технології": Тези доповідей. – К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, НАНУ. – 2005. – С.106.

6. Контроль якості зварювання в CO_2 за енергетичними показниками дуги / І.О. Скачков, А.Є. Пірумов // Досконалість зварювання – комплексний підхід: тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – Україна, Київ, 15-17 травня 2007 р. – К.: НТУУ "КПІ", 2008. – 84 с.

7. Контроль качества сварных соединений по электрическим параметрам дуги / А.Е. Пирумов, Ю.Г. Зазимко // IV Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та спеціалістів "Зварювання та суміжні технології": Тези доповідей. – К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, НАНУ. – 2007. – С.209.

АНОТАЦІЯ

Пірумов А.Є. Моніторинг якості дугового зварювання за електричними параметрами дуги. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", МОН України, Київ – 2009 р.

В дисертаційній роботі розглянуті питання розробки методики моніторингу якості дугового зварювання за електричними параметрами дуги. При визначенні дії збурень процесу дугового зварювання використовували штучні нейронні мережі.

Визначено параметри дугового зварювання в CO_2 та підводного дугового мокрого зварювання, що є інформативними для моніторингу якості.

Розроблено алгоритм підготовки та нормалізації даних для аналізу нейронними мережами. Проведено навчання нейронних мереж.

Розроблено алгоритм моніторингу якості дугового зварювання за електричними параметрами дуги.

Розроблено інформаційно – вимірювальну систему для статистичного аналізу електричних параметрів дугового зварювання.

Ключові слова: зварювання в CO_2 , підводне мокре зварювання, моніторинг якості, штучні нейронні мережі.

АННОТАЦИЯ

Пирумов А.Е. Мониторинг качества дуговой сварки по электрическим параметрам дуги. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 – Сварка, родственные процессы и технологии. – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", МОН Украины, Киев – 2009 г.

Диссертационная работа посвящена развитию методов неразрушающего контроля и мониторинга качества сварных изделий. Исследования проводились для двух способов дуговой сварки, а именно: сварки в CO_2 и подводной мокрой сварки.

В результате проведения работы решена актуальная задача по обеспечению качества сварных соединений выполненных дуговой сваркой в автоматическом режиме.

Установлено, что мониторинг качества дуговой сварки возможно проводить по характеристикам, которые в полной мере отображают стабильность протекания дугового процесса: выборочные среднее значение и дисперсия тока сварки и напряжения на дуге, а также среднее значение длительности коротких замыканий (для сварки в CO_2) или плотности к.з. в случае подводной мокрой сварки.

Изучено влияние характеристик оборудования и режимов сварки на информативные характеристики процесса сварки, что должно учитываться при построении системы мониторинга качества.

Разработана математическая стохастическая модель (компьютерная имитация) дуговой сварки с короткими замыканиями с помощью которой возможно оценивать влияние статических и динамических характеристик источника питания, а также параметров режима на информативные характеристики сварочного процесса.

Установлено, что на сегодняшний день по электрическим параметрам дуги возможно выявлять дефекты сварных соединений, которые не связаны с действием термических и деформационных процессов, а именно: непровары, прожоги, наплывы, кратеры, подрезы и несплавления.

Эксперименты показали, что использование искусственных нейронных сетей с обратными динамическими связями в алгоритме мониторинга позволяет связать электрические информативные параметры процесса дуговой сварки с геометрическими показателями качества сварного соединения с погрешностью не превышающей 9 % для подводной мокрой сварки и 7 % для сварки в CO_2 .

Подтверждено, что оптимальной длительностью участков осциллограммы, составляет 0,1 с, для проведения оценки нейронными сетями. Уменьшение длительности участка не приводит к повышению точности выявления возмущений.

В работе представлен разработанный алгоритм мониторинга качества изделий, обработка данных по которому ведется в два этапа, что позволяет оценивать как влияние параметров режима сварки, так и влияние возмущений, которые могут появляться во время сварки, на качество изделия.

В работе представлен разработанный алгоритм мониторинга качества соединений, согласно которому мониторинг проводят в три этапа:

- расчет среднеквадратического значения тока сварки и напряжения на дуге с целью определения соответствия режима сварки заданному;
- статистическая оценка осциллограмм тока и напряжения сварки, которая включает расчет среднеквадратических значений этих параметров и их отклонений. Определение мест выхода расчетных величин за установленные пределы с целью определения дефектов;

– оценка искусственными нейронными сетями с дальнейшей вейвлет - фильтрацией, для определения возмущений, который приводили к появлению дефектов.

Разработана информационно-измерительная система для мониторинга процесса сварки, позволяющая вести запись и статистическую обработку измеренных данных электрических параметров дуги.

Применение разработанной методики возможно в системах автоматического управления сварочными процессами, непрерывного мониторинга качества дуговой сварки и т.п.

Ключевые слова: сварка в среде CO₂, подводная мокрая сварка, мониторинг качества, искусственные нейронные сети.

ABSTRACT

Pirumov A.Ye. Arc welding quality monitoring based on electric characteristics of arc. – Manuscript.

The thesis for a scientific degree of Candidate of Sciences on specialty 05.03.06 – welding and related processes and technologies. – National technical university of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2009.

The thesis includes development of the procedure of arc welding quality monitoring based on electric characteristics of the electric arc. To define the effect of perturbing factors artificial neural networks were used.

It was determined that only weld formation defects may be predicted basing on the electric characteristics of the electric arc.

Parameters of MAG and wet underwater arc welding processes that may be used as informative ones for quality monitoring were determined.

The algorithm of data origination and standardization for neural networks was developed. The teaching of neural networks was carried out.

The algorithm of arc welding quality monitoring based on electric characteristics of the electric arc was developed.

The measuring system for statistical analysis of electric parameters of the arc welding processes was developed.

Key words: MAG welding, wet underwater arc welding, quality monitoring, artificial neural networks.