

Andrzej AMBROZIAK  
Zbigniew KORALEWICZ  
Marcin KORZENIOWSKI  
Paweł KUSTROŃ

## METODY KONTROLI JAKOŚCI ZGRZEIN PUNKTOWYCH W CZASIE RZECZYWISTYM

### ON-LINE QUALITY CONTROL METHODS DURING SPOT RESISTANCE WELDING PROCESS

*W obecnych czasach oprócz stosowania tradycyjnych metod kontroli jakości po procesie zgrzewania takich jak badania niszczące (zrywanie, wyluskiwanie, zglądy metalograficzne) oraz badania nieniszczące (badania ultradźwiękowe, badania rentgenowskie) istnieje silna potrzeba kontroli jakości wykonywanych zgrzein punktowych już w trakcie ich powstawania, w trakcie tworzenia ciekłego jądra zgrzeiny i równocześnie korekcja niezgodności i zakłóceń w procesie zgrzewania oporowego punktowego.*

*W artykule przedstawiono najbardziej znane metody kontroli jakości zgrzein punktowych w czasie rzeczywistym. Szerzej omówiono trzy metody: kontrolę jakości połączeń zgrzewanych w oparciu o sieci neuronowe, system kontroli jakości na bazie fuzzy logic oraz ultradźwiękową kontrolę jakości zgrzein w czasie rzeczywistym.*

**Słowa kluczowe:** zgrzewanie rezystancyjne punktowe, kontrola jakości zgrzein w czasie rzeczywistym

*This article contains some information about the main methods of quality control in spot resistance welding process. There's a lot of factor witch can influence on connection quality. We focused on three main methods, which are used during on-line process control. We present system based on neural-nets, PQS<sup>weld</sup>, system based on fuzzy logic and Ultrasonic Control System. Two of three mentioned methods investigate and measure the electrical parameters of resistance welding (voltage, welding current, dynamic resistance). The third one, measure the amplitude level of ultrasonic wave.*

**Keywords:** resistance welding quality, spot resistance welding

#### 1. Wstęp

Zgrzewanie oporowe punktowe jest stosunkowo prostą i tanią metoda łączenia części stalowych. W dobie szybkiego rozwoju techniki, gdzie czas i koszty odgrywają ważną rolę, w ostatnich latach zwrócono uwagę na jakość połączeń wykonywanych tą metodą. Konsument wymaga od producenta nie tylko gotowego wyrobu, ale również zapewnienia i dokumentacji o jakości jego wykonania i niezawodności użytkowania. Przez ostatnie dziesięciolecia wykonywano szereg badań połączeń zgrzewanych jednak były to badania jakości wykonywane na gotowych produktach oparte na metodach statystycznych bez możliwości poprawy istniejącego już wyrobu. Stwierdzono, że ilość złomu pobadaniowego można zredukować o ponad 97% stosując badania nienisz-

czące do kontroli jakości połączeń zgrzewanych po procesie zgrzewania. Koszty te można zmniejszyć jeszcze bardziej stosując kontrolę i regulacje procesu zgrzewania już w trakcie jego trwania.

Ze względu na wielką liczbę połączeń odpowiedzialnych wykonywanych techniką zgrzewania oporowego punktowego (np. w przemyśle samochodowym) istnieje silna potrzeba kontroli jakości wykonywanych zgrzein punktowych już w trakcie ich powstawania, w trakcie tworzenia ciekłego jądra zgrzeiny i równocześnie korekcja niezgodności i zakłóceń w procesie zgrzewania oporowego punktowego. Obecnie stosowanych jest kilka metod kontroli jakości zgrzein w trakcie procesu zgrzewania. Najczęściej stosowane to: pomiar rezystancji dynamicznej, pomiar emisji akustycznej i pomiar promieniowania cieplnego.

Do najczęściej spotykanych niezgodności połączeń zgrzewanych należą: przyklejenie, zbyt małe wymiany jądra zgrzeiny oraz ekspulsje (wypryski).

Najbardziej nowatorskimi metodami, dającymi nadzieję na eliminację ww. niezgodności są metody kontroli jakości w czasie rzeczywistym tj.

- system kontroli jakości połączeń zgrzewanych działający w oparciu o sieci neuronowe [1],
- PQS<sup>weld</sup> – system kontroli działający na bazie fuzzy logic [2],
- systemy ultradźwiękowej kontroli jakości zgrzein punktowych w czasie rzeczywistym [3 - 5].

Wymienione metody umożliwiają wykrycie niezgodności już w fazie ich powstawania. W przyszłości metody te oprócz identyfikacji niezgodności powstałych w trakcie procesu zgrzewania umożliwiały będą sterowanie parametrami procesu zgrzewania (prądem i czasem zgrzewania, siłą docisku elektrod), tak aby każda wytworzona zgrzeina spełniała stawiane jej wymogi [6].

## 2. System kontroli jakości działający w oparciu o sieci neuronowe

System działający w oparciu o sieci neuronowe opracowano m.in. w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach. Sieci neuronowe, po etapie uczenia, potrafią wygenerować właściwą odpowiedź na sygnały, które nie brały udziału w procesie uczenia.

System na nich oparty działa na zasadzie pomiaru i analizy przebiegu rezystancji dynamicznej procesu zgrzewania.

Do wyznaczenia rezystancji dynamicznej wymagany jest pomiar dwóch wielkości elektrycznych tj. prądu zgrzewania i napięcia między elektrodami zgrzewarki, mierzonymi w trakcie procesu. Umożli-

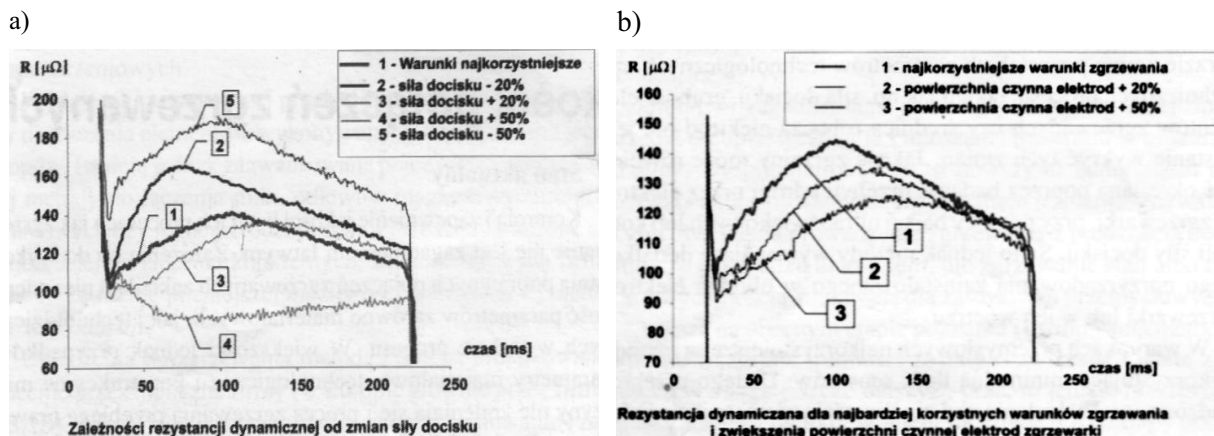
wia to uzyskanie odpowiedzi o jakości wykonanego połączenia na podstawie przebiegu zmian rezystancji dynamicznej bezpośrednio po zakończeniu procesu zgrzewania bez konieczności przeprowadzania w tym czasie badań wytrzymałościowych lub metalograficznych. Badania te są przeprowadzane wcześniej, a wyniki badań są przypisywane do odpowiadającej im pary pomiaru parametrów elektrycznych procesu, czyli prądu i napięcia [1].

Jak wykazano, istnieje ścisły związek pomiędzy zmianą parametrów technologicznych procesu zgrzewania (siła docisku, powierzchnia czynna elektrod, bocznikowanie prądu, prąd zgrzewania) a parametrami elektrycznymi. Na rys.1. przedstawiono zmiany rezystancji dynamicznej od czynników zewnętrznych (siła docisku, powierzchnia robocza elektrod).

W wyniku zmian parametrów elektrycznych i technologicznych procesu można doświadczalnie wyznaczyć odpowiadające im zmiany parametrów mechanicznych. Podstawowym kryterium jest w tym przypadku siła zrywająca złącze zgrzewane.

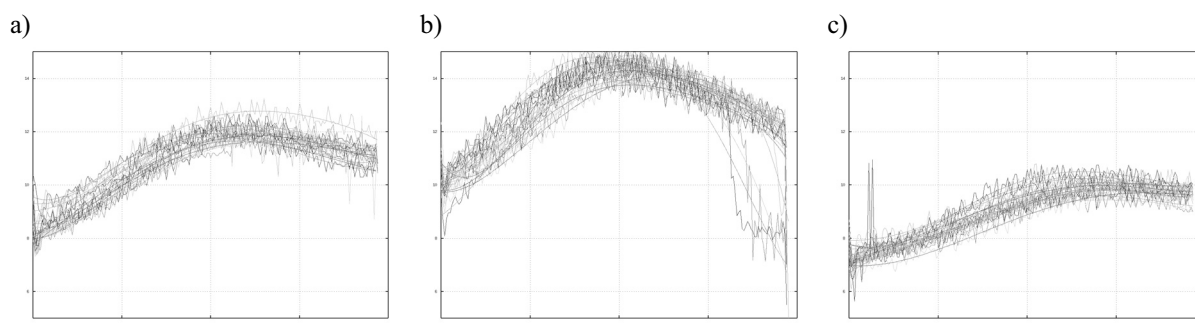
Aby zapewnić niezawodne działanie systemu decyzyjnego opartego na sieciach neuronowych konieczne jest tzw. uczenie sieci tj. wprowadzenie danych zebranych na podstawie badań w postaci dwóch serii: serii uczącej i serii testowej. W procesie uczenia bierze udział seria ucząca, natomiast seria testowa służy do określenia stopnia wytrenowania sieci i umożliwia przerwanie procesu uczenia w najbardziej odpowiednim momencie.

Omawiany system kontroli jakości zgrzein punktowych działający w oparciu o sieci neuronowe polega na porównaniu przebiegów rezystancji dynamicznej, rejestrowanych w trakcie procesu z przebiegami zarejestrowanymi wcześniej a tworzącymi bazę danych.



Rys.1. Przebiegi rezystancji dynamicznej, a) dla różnych sił docisku elektrod, b) dla różnej powierzchni roboczej elektrod [1]

Fig.1. Shape of curve of dynamic resistance, a) different welding force, b) different area of welding electrodes [1]



Rys.2. Rezystancja dynamiczna dla różnych warunków zgrzewania : a) optymalny prąd zgrzewania, b) prąd zgrzewania +10%, c) prąd zgrzewania -10% [1]

Fig.2. Dynamic resistance for different conditions of welding process: a) optimum welding current, b) welding current inc. 10%, c) welding current dec. 10% [1]

Przykładowe rzeczywiste przebiegi rezystancji dynamicznych przeprowadzonych w różnych warunkach zgrzewania przedstawiono na rys.2.

Wykonano szereg połączeń zgrzewanych, dla których zarejestrowano przebiegi parametrów elektrycznych procesu oraz określona została klasa jakości poprzez badania wytrzymałościowe. Przedstawiona powyżej kontrola procesu zgrzewania rezystancyjnego bazuje jedynie na pomiarze parametrów elektrycznych, przy czym możliwa jest kontrola dodatkowych wielkości, których wprowadzenie do systemu poprawi zapewne dokładność odpowiedzi systemu. Jednakże istnienie zależności charakteru przebiegów parametrów elektrycznych (szczególnie wyliczonej rezystancji dynamicznej) od zmiany parametrów technologicznych i materiałowych w procesie zgrzewania rezystancyjnego jest wystarczające do określenia jakości wykonywanych połączeń. Istnienie przedstawionej zależności jest warunkiem koniecznym dla zastosowania tej metody kontroli.

Metoda ta, poprzez pomiar jedynie parametrów elektrycznych procesu tj. prądu i napięcia, daje możliwość oceny jakości połączeń zgrzewanych w warunkach przemysłowych z uwagi na wyraźną zależność jakości zgrzeiny od zmian tych parametrów oraz stosunkowo prosty pomiar tych parametrów na stanowisku roboczym (zgrzewalniczym).

### 3. System kontroli jakości oparty na fuzji logic (logika rozmyta)

Teoria zbiorów rozmytych znalazła zastosowanie w procesie zgrzewania rezystancyjnego. Logika rozmyta (ang. fuzzy logic) zastosowana została przez firmę Harms&Wende w systemie kontroli jakości, jakim jest PQS<sup>weld</sup>. Przez zastosowanie analizy na bazie logiki rozmytej powstał sposób kontroli jakości łączący dwie właściwości: łatwe zbieranie sygnału prosto z procesu zgrzewania (poprzez pomiar prądu

i napięcia) oraz uzyskanie konkretnych informacji o jakości [2].

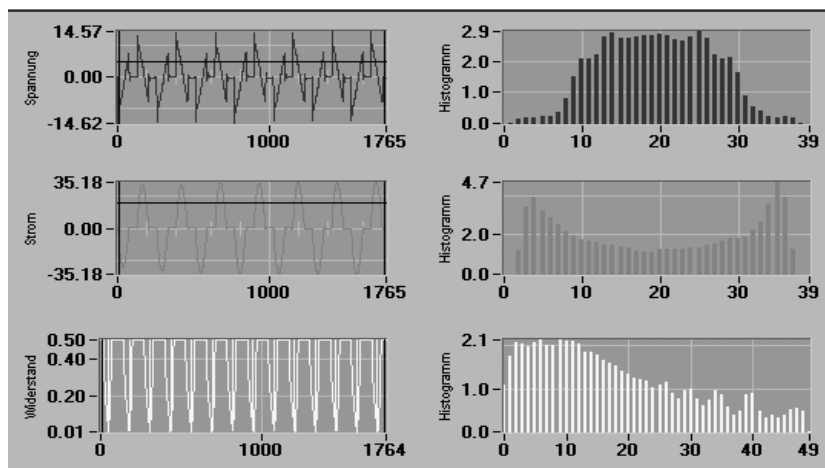
System PQS<sup>weld</sup> (niem. Prozess Qualität Steuerung) firmy Harms&Wende oparty jest na pomiarach z dużą dokładnością (do 50 000 pomiarów na sekundę) napięcia i natężenia prądu oraz wynikającej z nich rezystancji dynamicznej. Pomiar prądu następuje poprzez pętle pomiarową lub przekładnik prądowy. Pomiar napięcia natomiast odczytywany jest z możliwie bliskiego punktu zgrzewania, lecz poza elementami ruchomymi takimi jak np. elektrody. Własny integrator pomiarowy sprawia, iż możliwy jest pomiar prądu pętlą pomiarową dla prądu zmiennego i stałego 50Hz, jak również dla zgrzewarek inwerterowych 1000Hz [2].

Gdy zakończony zostaje każdy cykl zgrzewania oraz towarzyszący temu zbiór pomiarów, każdy przebieg sygnału poddawany jest odpowiedniej obróbce celem uzyskania histogramu (rys.3.). Dzięki tej operacji, dane zostają zagęszczone bez utraty istotnych informacji.

Histogram pozwala na uwypuklenie różnic w przebiegach sygnałów kolejnych zgrzein, których porównanie jest podstawą klasyfikacji jakości.

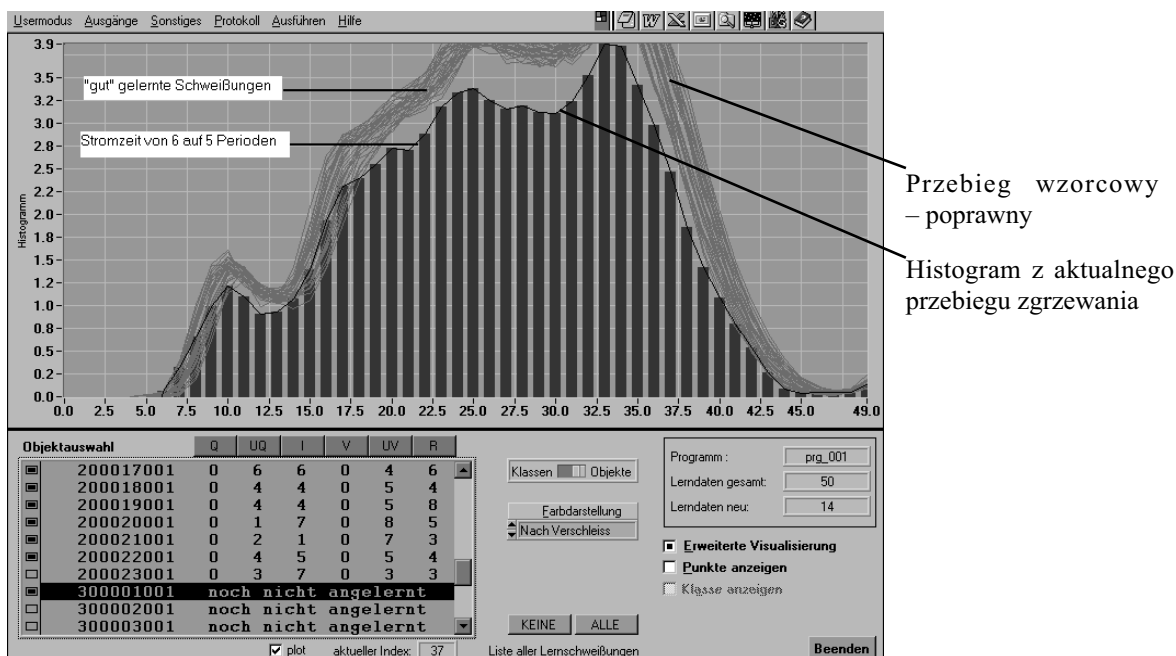
W pierwszej fazie uruchamiania system PQS<sup>weld</sup> musi zostać „nauczony”. Odbywa się to poprzez normalne badanie niszczące próbek, a następnie uzyskana w ten sposób ocena zgrzein, w odpowiednim szablonie programu, wprowadzana jest do bazy danych systemu. Tutaj następuje automatyczne ustalenie tolerancji wszystkich próbek i poprzez wykorzystanie funkcji fuzji powstaje rodzaj wstępnego opisu jakości zgrzein [2].

Przykład różnic histogramu dla próbki wzorcowej i dla próbki z wydłużonym czasem zgrzewania przedstawiono na rys.4.



Rys.3. Tworzenie histogramu z przebiegów prądu, napięcia i oporności [2]

Fig.3. Making the bar charts of current, voltage and resistance [2]



Rys.4. Różnica w histogramie z powodu zmiany czasu zgrzewania [2]

Fig.4. Difference in bar chart in case of changing welding time [2]

#### 4. Ultradźwiękowa metoda kontrola jakości zgrzein

Ultradźwiękowe metody kontroli jakości połączeń zgrzewanych znane są od dawna, od ponad stu lat, jednak wykorzystanie ich do kontroli jakości i sterowania w czasie rzeczywistym są rozwijane od kilku lat. Parametrami fal ultradźwiękowych wykorzystywanych do oceny jakości powstającej zgrzeiny są głównie tłumienie i prędkość fal ultradźwiękowych. Przedstawione systemy opierają się na pomiarze transmisji fal ultradźwiękowych.

Obecnie istnieje kilka rozwiązań technologicznych opracowanych przez różne koncerny, jednak zasady działania pozostają podobne. Na czołach obsadzeń elektrod (dolnej i górnej) umieszczono przetworniki ultradźwiękowe, które wytwarzają okresowo powtarzający się i szybko gasnący impuls ultradźwiękowy.

Impuls dociera do czoła elektrody poprzez ciecz chłodzącą, która stanowi ośrodek pośredniczący dla fal ultradźwiękowych. Do oceny jakości połączeń zgrzewanych stosowane są dwie podstawowe metody badań ultradźwiękowych metoda echa i metoda

przepuszczania [7]. Zasada badań przedstawiona została na rys.6.

Przetworniki ultradźwiękowe mogą być również umieszczone wewnątrz elektrody możliwie jak najbliżej powierzchni roboczej elektrody tzw. kapy, która jest elementem wymiennym (rys.7.)

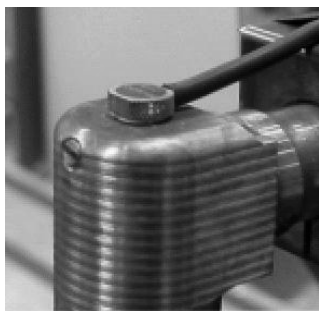
Na podstawie krzywej transmisji fal ultradźwiękowych (rys.8) można określić średnicę jądra zgrzeiny, wartość siły niszczącej (próba zrywania) oraz klasę jakości wykonanej zgrzeiny (na podstawie [6]). Ponadto system posiada możliwość korekcji parametrów zgrzewania w czasie rzeczywistym co sprawia, że jakość wykonywanego połączenia będzie zawsze zadowalająca.

Na podstawie badań własnych [5], [8] stwierdzono, że ultradźwiękowa kontrola połączeń w czasie rzeczywistym jest metodą czułą na czynniki zewnętrzne takie jak stan powierzchni roboczej elektrod oraz ich temperaturę. W przypadku przetworników ultradź-

więkowych umieszczonych wewnątrz elektrod należy zadbać o odpowiednie ich chłodzenie, gdyż wysoka temperatura (powyżej 80°C) może spowodować niejednoznaczność wyników pomiarów a w skrajnym przypadku doprowadzić do uszkodzenia główek ultradźwiękowych.

### 5. Podsumowanie

Przedstawiony system kontroli procesu PQS<sup>weld</sup> został wprowadzony i jest wytwarzany przez niemiecką firmę Harms&Wende, specjalizującą się w dziedzinie kontroli jakości zgrzein. Jest to bardzo czuły system, rozpoznający dokładnie odchylenia parametrów i porównujące je z nauczonymi wzorcami jakości. Zgrzeiny posiadające duży zakres bezpieczeństwa w parametrach zgrzewania wykazują dobre wyniki jakości w próbach niszczących, funkcja fuzzy logic rozpoznaje dokładnie odchylenia zapobiegając lub in-



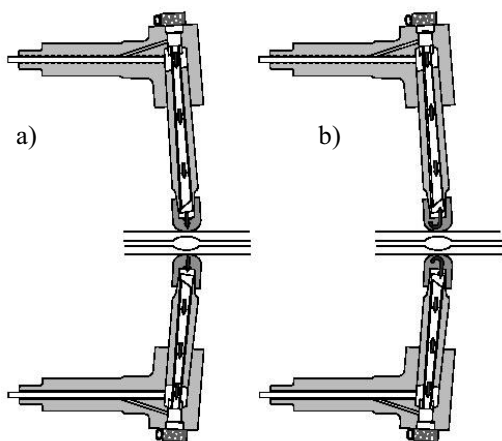
Rys. 5. Przetwornik ultradźwiękowy umieszczony na zewnątrz elektrody [3]

Fig. 5. Electrode with ultrasonic external sensor



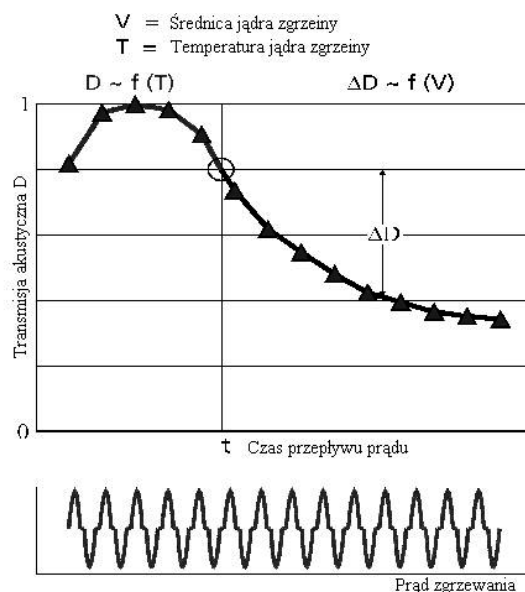
Rys.7. Przetworniki ultradźwiękowe umieszczone wewnątrz elektrod [3]

Fig.7. Ultrasonic sensors integrated into electrode [3]



Rys. 6. Zasada badań zgrzein punkrowych metodą echa i metodą przepuszczania [3]

Fig. 6. Ultrasonic measurements methods of spot welds. Transmittions method a), pulse (echo) method b) [3]



Rys. 8. Krzywa transmisji fal ultradźwiękowych [4]

Fig. 8. Curve of ultrasonic transmission in real time [4]

formując o ewentualnie niepożądanych zjawiskach. Zmiany i wahania w warunkach zgrzewania takie jak materiał, stan elektrod itp. zależnie od zebranych danych nauczania systemu mogą być prawidłowo rozpoznawane [9].

System kontroli jakości oparty na sieciach neuronowych, podobnie jak PQS<sup>weld</sup> bazuje jedynie na pomiarze parametrów elektrycznych procesu (natężenia prądu i napięcia), ale w odróżnieniu do nich inteligentną funkcją systemu jest sieć neuronowa, a nie fuzzy logic [9].

W przypadku systemów kontroli jakości opartych na pomiarze parametrów fal ultradźwiękowych, stwierdzono, że omawiana metoda pozwala na uzyskanie jednoznacznej informacji o stanie powstającego jądra zgrzeiny. Uzyskane w ten sposób dane mogą być użyte, nie tylko w celu oceny jakości powstającej zgrzeiny, ale również sterowania przebiegiem całego procesu.

## 6. Literatura

- [1] Kozaczyński J., Mikno Z., Stodolny P., System do kontroli jakości połączeń zgrzewanych w oparciu sieci neuronowe, Przegląd Spawalnictwa Nr 5-7/2004.
- [2] Straube A., Torzewski A., Winzen B.: PQS<sup>weld</sup> – System kontroli dla zgrzewania punktowego i garbowego na bazie fuzzy logic. Podstawy, możliwości i zastosowania praktyczne. Kontrola i sterowani w procesie zgrzewania rezystancyjnego. Jakość, rozwój, konkurencyjność i przyszłość. Seminarium Inst. Spaw. Gliwice – marzec 2004.
- [3] VOGT Werkstoffprüfsysteme - Inline ultrasonic testing system for process control during resistance spot welding.
- [4] Bosh Rexroth – Automatic ultrasonic tests – non destructive during the welding process.
- [5] Ambroziak A., Koralewicz Z., Korzeniowski M., Kustron P., Ocena jakości połączeń zgrzewanych z wykorzystaniem ultradźwiękowej metody kontroli w trakcie procesu zgrzewania rezystancyjnego punktowego.- Prace naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej, Zeszyt 73.
- [6] Polska Norma PN-74 M-69020, Klasyfikacja jakości zgrzein punktowych.
- [7] Talarczyk E., Podstawy techniki ultradźwięków, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1990.
- [8] Ambroziak A., Krynicki L., Koralewicz Z., Określenie przydatności badań ultradźwiękowych do oceny jakości połączeń zgrzewanych punktowo, Przegląd Spawalnictwa Nr 7-8/2000.
- [9] Bienias A. – Praca dyplomowa, Wrocław 2004.

---

**Dr hab. inż. Andrzej AMBROZIAK prof. ndzw. PWr.**

**Dr inż. Zbigniew KORALEWICZ**

**Mgr inż. Marcin KORZENIOWSKI**

**Mgr inż. Paweł KUSTROŃ**

Politechnika Wroclawska

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji

ul. Łukasiewicza 3/5, Wrocław

e-mail: andrzej.ambroziak@pwr.wroc.pl, tel. 071 320 21 48

e-mail: zbigniew.koralewicz@pwr.wroc.pl, tel. 071 320 27 38

e-mail: marcin.korzeniowski@pwr.wroc.pl, tel. 071 320 42 55

e-mail: pawel.kustron@pwr.wroc.pl, tel. 071 320 42 55

---