

## ZASTOSOWANIE FAL ULTRADŹWIĘKOWYCH DO OCENY JAKOŚCI POŁĄCZEŃ ZGRZEWANYCH W CZASIE RZECZYWISTYM

### ULTRASONIC QUALITY CONTROL DURING RESISTANCE WELDING PROCESS

*W artykule przedstawiono jedną z nowatorskich metod obserwacji przebiegu procesu zgrzewania rezystancyjnego punktowego w czasie rzeczywistym. Oparta jest ona na pomiarze parametrów, przechodzącej przez zgrzeinę, fali ultradźwiękowej. Przeprowadzone badania wykazały, iż 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. Zapewnianie wysokiej jakości zgrzein jest niewątpliwie bardzo istotnym zagadnieniem, szczególnie wobec masowego zastosowania tej technologii w wielu gałęziach przemysłu. Szerokie zainteresowanie rozwiązaniami, pozwalającymi kontrolować przebiegiem procesu tworzenia się jądra zgrzein, wynika głównie z możliwości ograniczenia wpływu zakłóceń na proces (przyczyn występowania niezgodności w powstających złączach) a nie, jak to dotychczas miało miejsce, jedynie obserwacji ich skutków, po fakcie powstania zgrzeiny.*

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

*This article presents some information about quality control in resistant welding process. There are many methods which can give us information about quality of weld after it's arise. Resistant welding is very sensitive for lots of factors like: electric power excursion, electrodes and material surface's condition, electrical by-pass, etc. It usually causes worse quality of the connection. To prevent this factor's influence, welding process should be controlled in the real time. One of the promising methods is Ultrasonic Control System. It is based on measuring amplitude of ultrasonic wave, which flow across the weld. Theoretical characteristic of ultrasonic transmission was shown on fig.3. This curve shows that ultrasonic method can give many, important information about welding process, like: size of welding nuggets, it's arise and crystallization moment but first of all, current switching-off moment. All abilities of this method can be used to find weld quality, controlling welding process and prevent many dangerous factors in the time of weld arising.*

**Keywords:** resistance welding, ultrasonic welding control

#### 1. Wprowadzenie

Zgrzewanie rezystancyjne punktowe należy do najbardziej rozpowszechnionych metod łączenia miejscowego różnorodnych konstrukcji metalowych. Istota metody pozostaje niezmienną od ponad 125 lat [1]. Ma ona szereg charakterystycznych zalet, do których przede wszystkim zaliczyć należy stosunkowo niskie zużycie energii elektrycznej, szybkość wykonania jednego połączenia oraz brak

konieczności stosowania materiałów dodatkowych. Fakty te decydują o tak powszechnym zastosowaniu tej technologii. Jak podają dane statystyczne, w Polsce wykonuje się około 2 miliardów zgrzein punktowych rocznie. Najczęściej znajduje ona zastosowanie przy produkcji karoserii samochodowych, maszyn rolniczych, konstrukcji budowlanych, jak również sprzętu gospodarstwa domowego. Ewolucja procesów zgrzewania rezystancyjnego obejmuje zarówno materiały łączone, o coraz to wyższych własnościach eksplo-

atacyjnych, jak i same zgrzewarki, wyposażane m. in. w różnego rodzaju urządzenia sterujące.

## 2. Opis zastosowanej metody - stanowisko pomiarowe

Podstawowymi czynnikami, ujemnie wpływającymi na jakość powstających złącz zgrzewanych punktowo są:

- stan powierzchni łączonych elementów,
- stan elektrod,
- wahania napięcia w sieci zasilającej urządzenie,
- bocznikowanie,
- odkształcenia blach.

Przedstawione wyżej zjawiska w znacznym stopniu przyczyniają się do powstawania zgrzein wadliwych. Powstałe niezgodności są z reguły trudne do wykrycia i ujawniają się dopiero w okresie eksploatacji wyrobu.

Do najczęściej spotykanych wad złącz zgrzewanych punktowo należą:

- przyklejenie,
- zbyt mała średnica jądra zgrzeiny,
- pęknięcia,
- pory,
- nadtopienie powierzchni,
- wyprysk (ekspulsje).

Powszechność procesów zgrzewania rezystancyjnego punktowego oraz zastosowanie zgrzein w konstrukcjach odpowiedzialnych spowodowały, że tradycyjne metody kontroli złączy, takie jak badania penetracyjne, magnetyczne i rentgenowskie, mogą być stosowane jedynie jako metody uzupełniające do badań wytrzymałościowych i metalograficznych. Z tego powodu konieczne jest sterowanie i kontrola jakości rezystancyjnego zgrzewania już w czasie trwania tego procesu, w celu zminimalizowania liczby zgrzein wadliwych oraz dla bieżącej kontroli przebiegu procesu i stanu urządzeń.

Istnieje bardzo szeroka gama metod, pozwalających wnioskować o jakości powstających połączeń. Oparte są one najczęściej na pomiarze:

- prądu, napięcia i rezystancji dynamicznej,
- tłumienia i prędkości fal ultradźwiękowych,
- energii zgrzewania,
- rozszerzalności cieplnej złącza,
- promieniowania podczerwonego,
- emisji akustycznej.

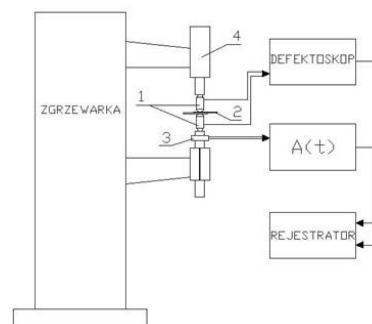
Metody te mają zarówno szereg zalet jak i wad. W przypadku metod kontroli przemieszczenia elektrod w trakcie zgrzewania, emisji akustycznej, promieniowania podczerwonego czy metody ultradźwiękowej, konieczne jest zastosowanie skomplikowanej aparatury pomiarowej. Dużą popularność zyskuje obecnie metoda oparta na pomiarze rezystancji dynamicznej

[2]. Każda z wymienionych metod pozwala jednak na uzyskanie tylko określonych informacji o procesie tworzenia zgrzeiny. Metoda ultradźwiękowa jest bardzo czułym narzędziem, pozwalającym na uzyskanie informacji z poszczególnych etapów powstawania jądra zgrzeiny, jego rozrostu oraz krzepnięcia.

Istnieje wiele metod pomiaru transmisji (tłumienia) fal ultradźwiękowych. Najczęściej stosowane to metoda echa oraz metoda przepuszczania. Metoda echa polega na wykorzystaniu jednej głowicy (nadawczo-odbiorczej), metoda przepuszczania wykorzystuje dwie głowice, z których jedna pracuje jako głowica nadawcza, druga jako odbiorcza [3]. W badaniach wykorzystano drugą z wymienionych metod - metodę przepuszczania.

W celu kontroli procesu zgrzewania punktowego wykorzystano właściwości fal ultradźwiękowych. Rejestracja przebiegu krzywych transmisji fal w czasie powstawania złącza, pozwoliła na otrzymanie grupy charakterystyk umożliwiających wnioskowanie o jakości zgrzeiny na podstawie kształtu tych krzywych.

Jako generator fal ultradźwiękowych wykorzystano defektoskop, który sprzężono z komputerem. W czasie wykonywania zgrzeiny rejestrowano amplitudę wiązki fal ultradźwiękowych przechodzących przez elementy zgrzewane. Wartość amplitudy, zamieniona na sygnał elektryczny, rejestrowana była przez komputer. Rejestrator wyników (komputer PC) wyposażono w kartę pomiarową z procesorem DSP, która umożliwiła zapis i obróbkę odbieranego z defektoskopu sygnału. Równocześnie, w trakcie procesu mierzono i rejestrowano prąd zgrzewania za pomocą urządzenia Pp-7d. Do pomiarów wykorzystano zgrzewarkę produkcji polskiej ZPa-80 (rys. 1).



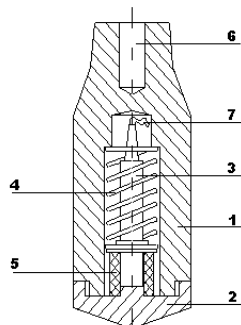
Rys. 1. Stanowisko pomiarowe:

1 – głowice ultradźwiękowe, 2 – materiał zgrzewany, 3 – toroid – pomiar prądu zgrzewania, 4 – siłownik pneumatyczny.

Fig. 1. Ultrasonic data acquisition system:

1 – electrode, 2 – material (sheet iron plate), 3 – current measurement system, 4 – pneumatic actuator;

Do generacji i odbioru fal akustycznych wykorzystano głowice ultradźwiękowe UNIPAN LN4LN7, które umieszczono w odpowiednio skonstruowanych elektrodach (rys. 2). Głowice te mogą pracować zarówno jako nadajniki jak i odbiorniki sygnałów ultradźwiękowych. Ich częstotliwość pracy wynosi 4 MHz.



Rys. 2. Budowa elektrody z głowicą ultradźwiękową:  
1 – obudowa, 2 – czoło elektrody, 3 – głowica ultradźwiękowa, 4 – sprężyna dociskowa, 5 – tuleja dystansowa, 6 – kanał cieczy chłodzącej, 7 – przewód sygnałowy

Fig. 2. Welding electrode with ultrasonic head:  
1 – casing, 2 – electrode head, 3 – ultrasonic head, 4 – spring, 5 – distance sleeve, 6 – cooling channel, 7 – signal cable

### 3. Wpływ zmian parametrów zgrzewania na uzyskiwane przebiegi transmisji

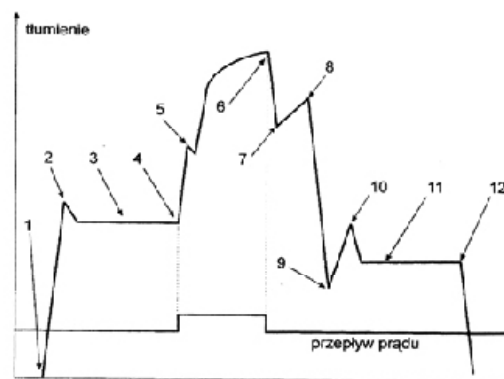
Celem badań było ustalenie wpływu parametrów zgrzewania na przebieg tłumienia fali ultradźwiękowej. Zastosowano zmianę parametrów zgrzewania w celu uzyskania różnego rodzaju zgrzein – prawidłowych oraz nieprawidłowych (brak zgrzania, przegrzanie, przyklejenia, ekspulsje, itp.).

Poniżej przedstawiono teoretyczny przebieg „tłumienia” fali ultradźwiękowej, wraz z podziałem na charakterystyczne etapy [4].

W trakcie procesu tworzenia prawidłowej zgrzeiny można wyróżnić następujące etapy:

1. moment połączenia elektrod z materiałem zgrzewanym,
2. dociskanie nierówności na powierzchni zgrzewanych blach,
3. stabilizacja przepływu strumienia fali ultradźwiękowej,
4. moment włączenia prądu zgrzewania, gwałtowny wzrost temperatury,
5. rozpoczęcie tworzenia się ciekłego jądra zgrzeiny,
6. wyłączenie prądu zgrzewania, spadek temperatury zgrzeiny,
- 7 i 8. krystalizacja i chłodzenie się ciekłego jądra zgrzeiny,

- 9 i 10. zaburzenia przepływu fali na skutek skurczu materiałów podczas spadku ich temperatury,
11. docisk końcowy,
12. rozchylenie elektrod.



Rys. 3. Typowy przebieg tłumienia dla prawidłowej zgrzeiny

Fig. 3. Typical damping vs time dependence

Teoretycznie, w przypadku utworzenia się prawidłowej zgrzeiny, każdy z wymienionych etapów winien uwidocznić się na krzywej „tłumienia” fal ultradźwiękowych.

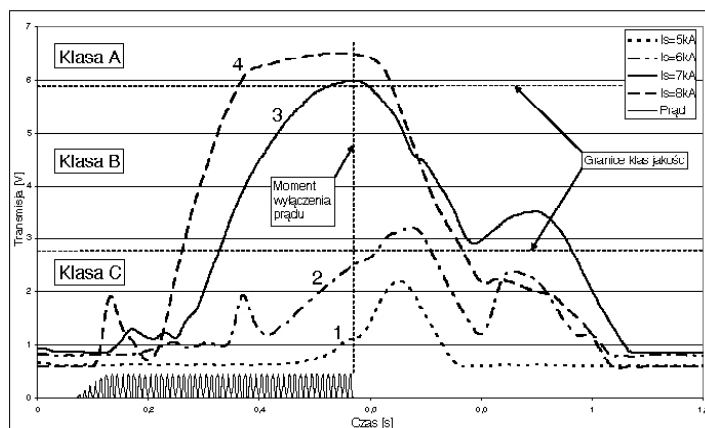
Dla wszystkich próbek dokonywano pomiaru transmisji fali ultradźwiękowej. Mierzono amplitudę fali akustycznej przechodzącej przez zgrzeinę.

Badania przeprowadzono na próbkach ze stali S235JRG2 o grubości 1.5mm. W celu uzyskania różnorodnych połączeń zmieniano parametry zgrzewania ( $I_s = 5 \div 8$  kA, rys. 4). Następnie uzyskane połączenia poddawano próbie wytrzymałościowej – próbie ścinania wg PN-74 M-69020 [5].

Poniżej przedstawiono wybrane z uzyskanych przebiegów rzeczywistych.

Na rys. 4 pokazano cztery z zarejestrowanych charakterystycznych przebiegów transmisji fali przechodzącej przez zgrzeinę w czasie zgrzewania. Porównując je z przebiegiem teoretycznym (rys. 3) można stwierdzić, iż wraz ze wzrostem wartości prądu i czasu zgrzewania, rośnie również wartość transmisji przechodzącej badanej fali, oraz znacząco zmienia się kształt wykresu.

Przyporządkowania wykonanych zgrzein oraz towarzyszących im charakterystyk tłumienia fal ultradźwiękowych do odpowiedniej klasy jakości dokonano na podstawie normy. Podstawą klasyfikacji są tu: minimalna wartość siły niszczącej, wymiary zgrzeiny, dopuszczalne wady wewnętrzne i wygląd zewnętrzny. Przedstawione poniżej wykresy opisują zależność siły niszczącej złącze od czasu i prądu zgrzewania. Pokazano również przedziały badanej siły, przedstawiające



Rys. 4. Rzeczywiste przebiegi transmisji dla stałego czasu 0,52s oraz czterech różnych nastaw natężenia prądu zgrzewania

Fig. 4. Real damping vs. time dependence for four different current values

zakresy odpowiednich klas jakości. Ostatecznej oceny powstałych zgrzein dokonano uwzględniając wszystkie wyżej wymienione kryteria.

Zarówno z punktu widzenia oceny jakości powstającej zgrzeiny, jak i sterowania przebiegiem procesu, najważniejszym elementem charakterystyki transmisji (rys. 4) jest obszar, w którym zostaje wyłączony prąd zgrzewania. Na podstawie obserwacji, rejestrowanych przebiegów stwierdzono, że najdokładniej oddaje on informacje o jakości zgrzeiny.

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie analizy uzyskanych wyników (rys. 4) można zauważyć, iż dla przebiegów transmisji oznaczonych jako 1 i 2 wartość transmisji jest sto-

sunkowo mała, co wskazuje na zbyt małą średnicę jądra zgrzeiny lub przyklejenie. Wynika stąd również mniejsza wytrzymałość złączy, a więc zostały one zakwalifikowane do klasy jakości C.

Natomiast złącza w klasie A opisane są za pomocą krzywych transmisji 3 i 4 (rys. 4). Wynika z nich, że przy stosowaniu większych wartości prądu uzyskano żadaną wartość transmisji fal ultradźwiękowych, charakterystyczną dla poprawnie wykonanych zgrzein.

Przeprowadzone badania wskazują na ścisły związek między jakością otrzymanej zgrzeiny a wartością transmisji fal ultradźwiękowych przy wykonywaniu zgrzein punktowych. Potwierdzają to badania wytrzymałościowe (statyczne próby ścinania złączy ze stali S235JRG2 o grubości 1,5 mm).

#### 5. Literatura

- [1] Kozaczyński J., Mikno Z., Stodolny P.: *System do kontroli jakości połączeń zgrzewanych w oparciu o sieci neuronowe*, Gliwice, Instytut Spawalnictwa, 2004.
- [2] Straube A., Torzewski A., Winzen B.: *Stabilizacja procesu zgrzewania poprzez logiczne reakcje na jego przebieg podczas zgrzewania punktowego*, Niemcy, Harms&Wende, 2004.
- [3] Talarczyk E.: *Podstawy techniki ultradźwięków*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1990.
- [4] Ambroziak A., Krynicki L., Koralewicz Z.: *Określenie przydatności badań ultradźwiękowych do oceny jakości połączeń zgrzewanych punktowo*, Przegląd Spawalnictwa Nr 7-8/2000.
- [5] Polska Norma PN-74 M-69020, *Klasyfikacja jakości zgrzein punktowych*.

**Dr hab. inż. Andrzej AMBROZIAK prof. ndzw. PW**  
**Dr inż. Zbigniew KORALEWICZ**  
**Mgr inż. Marcin KORZENIOWSKI**  
**Mgr inż. Paweł KUSTROŃ**

Politechnika Wroclawska  
 Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji  
 Wroclaw ul. Łukasiewicza 3/5  
 e-mail: pawel.kustron@pwr.wroc.pl