

Ryszard Krawczyk<sup>1\*</sup>, Piotr Wojtas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Politechnika Częstochowska

<sup>2</sup>Rafako S.A., Racibórz

# Dokładność oceny w badaniach ultradźwiękowych złączy spawanych techniką DGS

## Accuracy of assessment in ultrasonic testing of DGS welded joints

### ABSTRACT

The analysis presented in the study was to determine the accuracy in the assessment system used when testing welded joints using the ultrasonic method using the DGS technique. An attempt was made to determine the DDSR reference reflector as a function of the thickness of the tested material. The designated reflector allowed the assessment of sensitivity of reference reflectors adopted according to PN-EN ISO 17640.

**Keywords:** ultrasonic tests; DGS technique; test sensitivity; accuracy of assessment; welded joints

### STRESZCZENIE

Przedstawiona w opracowaniu analiza miała na celu określenie dokładności w systemie oceny stosowanym przy badaniu złączy spawanych metodą ultradźwiękową z zastosowaniem techniki DGS. Podjęto próbę wyznaczenia reflektora odniesienia DDSR jako funkcji grubości badanego materiału. Wyznaczony reflektor pozwolił na ocenę czułości reflektorów odniesienia przyjętych wg normy PN-EN ISO 17640.

**Słowa kluczowe:** badania ultradźwiękowe; technika DGS; czułość badania; dokładność oceny; złącza spawane

### 1. Wstęp

Badania ultradźwiękowe złączy spawanych prowadzone są głównie na podstawie normy PN-EN ISO 17640 [1]. Warunki tej normy określone zostały dla badania złączy spawanych z pełnym przetopem materiałów ferrytycznych w zakresie grubości od 8 do 100 mm. W normie tej zalecane jest stosowanie czterech technik badania różniących się głównie rodzajem reflektora odniesienia oraz zalecanym zakresem grubości badanych materiałów. Spośród tych czterech technik dominującą rolę w badaniach prowadzonych najczęściej w Europie odgrywa technika nr 2 zwana DGS, bazująca na reflektorze odniesienia w postaci płaskodennego otworu DDSR o średnicy zależnej od grubości badanego materiału. Przyjęte w normie średnice reflektora odniesienia DDSR wynoszą odpowiednio 1,5; 2,0; 2,5 i 3,0 mm i obowiązują dla przedziałów grubości badanych materiałów 8 do 15, 15 do 40 i 40 do 100 mm w zależności od częstotliwości wiązki fali ultradźwiękowej oraz przyjętego poziomu akceptacji. Zależności te przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Zależność średnicy reflektora odniesienia  $D_{DSR}$  [mm] od grubości materiału i częstotliwości wiązki fali ultradźwiękowej

Tab. 1. Dependence of the  $D_{DSR}$  [mm] reference reflector diameter on material thickness and ultrasonic wave frequency

Nominalna częstotliwość głowicy [MHz]	Grubość materiału t [mm] i poziom akceptacji					
	8 ≤ t < 15		15 ≤ t < 40		40 ≤ t < 100	
	PA 2	PA 3	PA 2	PA 3	PA 2	PA 3
2,0 do 2,5	-	-	$D_{DSR}=2,5$	$D_{DSR}=2,5$	$D_{DSR}=3,0$	$D_{DSR}=3,0$
3,0 do 5,0	$D_{DSR}=1,5$	$D_{DSR}=1,5$	$D_{DSR}=2,0$	$D_{DSR}=2,0$	$D_{DSR}=3,0$	$D_{DSR}=3,0$

Jak wynika z tabeli 1, przyjęte średnice reflektorów odniesienia DDSR zmieniają się skokowo w odpowiednich przedziałach

grubości badanych materiałów. Zmiana skokowa reflektora odniesienia oznacza wpływ na zmianę czułości w realizowanych badaniach złączy spawanych o różnych grubościach w danym przedziale, a tym samym wpływ na ocenę. Charakter zmiany reflektora odniesienia ma kluczowe znaczenie dla dokładności w ocenie badanych złączy spawanych, ponieważ stanowi podstawę do wyznaczenia poziomu odniesienia przyjętego w normie PN-EN ISO 11666 [2]. Względem wyznaczonego poziomu odniesienia określone zostały pozostałe kryteria stosowane w ocenie, tj. poziom oceny, poziom rejestracji oraz poziom akceptacji.

### 2. Założenia do analizy

Celem przeprowadzonej analizy była ocena dokładności w badaniach ultradźwiękowych złączy spawanych przeprowadzanych na podstawie norm PN-EN ISO 17640 i PN-EN ISO 11666. Analizę przeprowadzono dla najszerszej stosowanej w badaniach ultradźwiękowych techniki nr 2 (DGS) i zakresu grubości materiału tj. od 8 do 100 mm oraz częstotliwości głowicy 4 MHz.

Podstawę do przeprowadzonej analizy stanowiła wyznaczona wartość średnicy reflektora odniesienia, która z kolei jest podstawą do wyznaczenia czułości badania. Wyznaczona wartość średnicy reflektora odniesienia została określona w funkcji w przyjętym zakresie grubości materiału. Szacowanie dokładności oceny natomiast przeprowadzono, porównując uzyskane wartości reflektora odniesienia wyznaczone w funkcji grubości materiału do reflektora odniesienia określonego w normie PN-EN ISO 17640.

### 3. Analiza czułości reflektora tarczowego

W pierwszym etapie analizy wyznaczono ubytek przekroju

\*Autor korespondencyjny. E-mail: ryszardkrawczyk@spaw.pcz.pl

badanego materiału poddanego próbie rozciągania do maksymalnych naprężeń o wartość przekroju reflektora tarczowego. Do analizy przyjęto wymiary próbek poddawanych naprężeniom rozciągającym zgodnie z PN-EN ISO 4136 z przedziału grubości powyżej 2 mm, gdzie podstawą przekroju jest wymiar  $a = 25$  mm, natomiast wymiar  $b$  jest wysokością przekroju, która odpowiada grubości  $t$  materiału w mm [3].

Skalowanie czułości przyjęto dla płaskodennego otworu o średnicy 1,5; 2,0 oraz 3,0 mm w odpowiednich zakresach grubości od 8 do 15 mm, od 15 do 40 mm oraz od 40 do 100 mm. Wartość średnicy reflektora płaskodennego w funkcji grubości materiału została wyznaczona zgodnie z przedstawionymi poniżej kolejnymi zależnościami [5].

Pole przekroju próbki poddawanej naprężeniom rozciągającym  $[mm^2]$ :

$$S = a \cdot b = 25 \cdot t \quad (1)$$

gdzie:

$a$  – stała podstawa przekroju 25 mm wg PN-EN ISO 4136 [3],

$b$  – wysokość przekroju dla grubości materiału  $t$  [mm].

Pole przekroju reflektora płaskodennego  $[mm^2]$ :

$$S_{DSR} = \frac{\pi \cdot D_{DSR}^2}{4} \quad (2)$$

gdzie:  $D_{DSR}$  – średnica reflektora płaskodennego [mm].

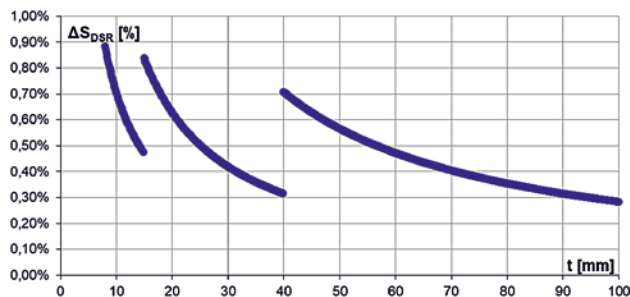
Procentowy ubytek przekroju [%]:

$$\Delta S_{DSR} = \frac{S_{DSR}}{S} \cdot 100 \quad (3)$$

gdzie:

$S_{DSR}$  – pole powierzchni reflektora płaskodennego  $[mm^2]$ ,  
 $S$  – pole powierzchni próbki poddawanej naprężeniom rozciągającym  $[mm^2]$ .

Przedstawiono wyznaczone wartości procentowego ubytku przekroju w funkcji grubości materiału (rys. 1) dla trzech przedziałów grubości  $t = 8 \div 15$  mm,  $t = 15 \div 40$  mm i  $t = 40 \div 100$  mm zalecanych w normie PN-EN ISO 11666. W przedziałach tych poziom odniesienia badania wyznaczany jest odpowiednim reflektorem tarczowym o średnic 1,5; 2,0 oraz 3,0 mm.



Rys. 1. Procentowy ubytek przekroju w funkcji grubości materiału  $t$   
Fig. 1. Percentage loss in cross-section as a function of material thickness  $t$

Rzeczywiste pole przekroju poddawane naprężeniom rozciągającym  $[mm^2]$ :

$$S_{rz} = S - S_{DSR} \quad (4)$$

gdzie:

$S$  – całkowite pole powierzchni próbki poddawanej naprężeniom rozciągającym  $[mm^2]$ ,

$S_{DSR}$  – pole powierzchni reflektora płaskodennego  $[mm^2]$ .

Rzeczywiste naprężenia rozciągające  $\sigma_{rz}$  [MPa]:

$$\sigma_{rz} = \bar{\sigma} \cdot \frac{S_{rz}}{S} \quad (5)$$

gdzie:

$\bar{\sigma}$  – średnia wartość naprężeń rozciągających przyjęta dla stali S355 na podstawie normy PN-EN 10025 [4] = 550 [MPa],

$S_{rz}$  – rzeczywiste pole przekroju poddawane naprężeniom rozciągającym  $[mm^2]$ ,

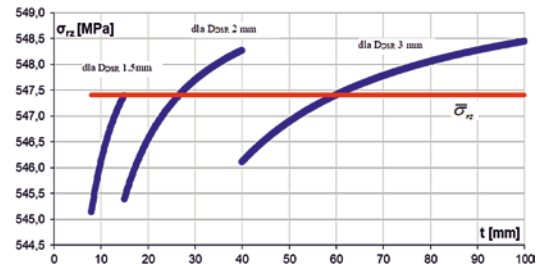
$S$  – całkowite pole powierzchni próbki poddawanej naprężeniom rozciągającym  $[mm^2]$ .

Średnia wartość naprężeń rozciągających  $\sigma_{rz}$  wyznaczona dla zakresu grubości od 8 do 100 mm wg zależności [MPa]:

$$\bar{\sigma}_{rz} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{rz_i}}{n} \quad (6)$$

gdzie:  $n$  – liczba danych  $\sigma_{rz}$  w zbiorze

Przedstawiona na rys. 2 zależność rzeczywistych naprężeń rozciągających i naprężeń uśrednionych w funkcji grubości materiału określona została dla trzech przedziałów odpowiednio dla  $t = 8 \div 15$  [mm],  $t = 15 \div 40$  [mm] oraz  $t = 40 \div 100$  mm.



Rys. 2. Naprężenia rozciągające  $\sigma_{rz}$  w funkcji grubości materiału  $t$  oraz średnia wartość

Fig. 2. Tensile stress  $\sigma_{rz}$  as a function of material thickness  $t$  and average value

Pole przekroju rzeczywistego reflektora płaskodennego  $[mm^2]$ :

$$S'_{DSR} = S - S \cdot \frac{\bar{\sigma}_{rz}}{\sigma_{rz}} \quad (7)$$

gdzie:

$S$  – całkowite pole powierzchni próbki poddawanej naprężeniom rozciągającym  $[mm^2]$ ,

$\bar{\sigma}_{rz}$  – średnia wartość naprężeń rozciągających [MPa].

$\sigma_{rz}$  – rzeczywiste naprężenia rozciągające [MPa].

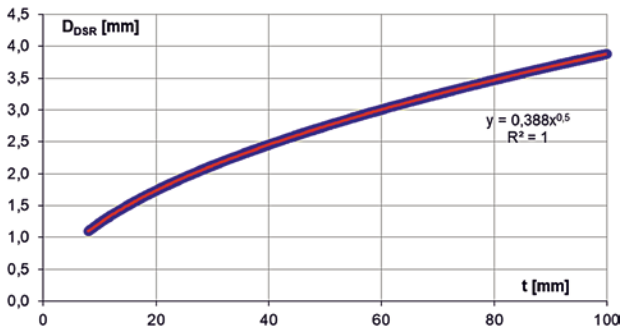
Średnica rzeczywistego reflektora płaskodennego [mm]:

$$D'_{DSR} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S'_{DSR}}{\pi}} \quad (8)$$

gdzie:

$S'_{DSR}$  – pole powierzchni reflektora płaskodennego  $[mm^2]$ .

Zbiór danych wyznaczonych średnic rzeczywistych reflektora płaskodennego w funkcji grubości materiału przedstawiono na rys.3.



Rys. 3. Zależność rzeczywistego płaskodennego reflektora tarczowego w funkcji grubości materiału

Fig. 3. Dependence of the real flat-bottomed disc reflector as a function of material thickness

Po przeprowadzeniu analizy regresji na zbiorze danych wyznaczonych średnic rzeczywistych reflektora płaskodennego  $D'_{DSR}$  w funkcji grubości materiału uzyskano równanie w postaci:

$$y = 0,388 \cdot t^{0,5} \quad (9)$$

Postać tego równania została wyznaczona z najwyższym współczynnikiem regresji  $R^2 = 1$ .

Po zaokrągleniu uzyskanej zależności otrzymujemy równanie, dzięki któremu możemy łatwo wyznaczać średnicę dowolnego reflektora tarczowego  $D_{DSR}$  [mm] w zależności od grubości  $t$  badanego materiału.

$$D_{DSR} = 0,4 \cdot \sqrt{t} \quad (10)$$

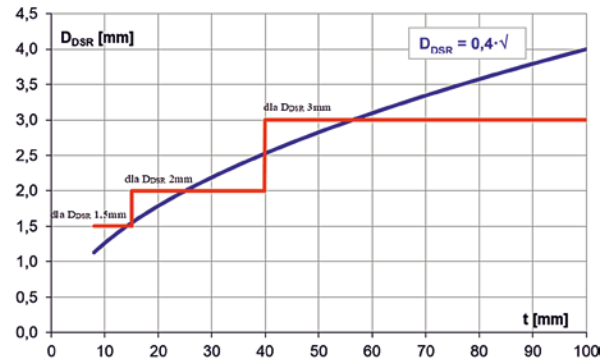
gdzie:

$t$  – grubość materiału [mm].

W drugim etapie analizy w celu określenia wpływu na dokładności oceny niezgodności w realizowanych badaniach ultradźwiękowych zestawiono wyznaczone poziomy odniesienia wg reflektorów tarczowych zalecanych zgodnie z normą PN-EN ISO 17640 i wyznaczonego w pierwszej części analizy rzeczywistego reflektora jako ciągłej funkcji grubości materiału. Powyższe zależności przedstawiono na rys.5.

Przedstawione na wykresie rys.5 zależności reflektorów tarczowych o przebiegu skokowym wg normy PN-EN ISO 17640 i ciągłym wyznaczonym w prezentowanej analizie w funkcji grubości materiału wykazują zróżnicowane czułości w różnych obszarach grubości materiału. W tym:

- Zbieżne wyniki czułości obu reflektorów tarczowych dla grubości:
  - $t = 15$  mm dla  $D_{DSR}$  1,5 mm;
  - $t = 25$  mm dla  $D_{DSR}$  2,0 mm;
  - $t = 55$  mm dla  $D_{DSR}$  3,0 mm;
- Obniżoną czułość reflektorów tarczowych skokowych w przedziałach dla grubości:
  - $8 \leq t < 15$  mm dla  $D_{DSR}$  1,5 mm;
  - $15 \leq t < 25$  mm dla  $D_{DSR}$  2,0 mm;
  - $40 \leq t < 55$  mm dla  $D_{DSR}$  3,0 mm;
- Podwyższoną czułość reflektorów tarczowych skokowych w przedziałach dla grubości:
  - $25 \leq t < 40$  mm dla  $D_{DSR}$  2,0 mm;
  - $55 \leq t < 100$  mm dla  $D_{DSR}$  3,0 mm.



Rys. 4. Poziomy odniesienia wyznaczone wg reflektorów tarczowych zgodnie z PN-EN ISO 17640 i wyznaczonego rzeczywistego reflektora jako ciągłej funkcji grubości materiału

Fig. 4. Reference levels determined according to disc reflectors in accordance with PN-EN ISO 17640 and the determined actual reflector as a continuous function of material thickness

Obniżenie czułości reflektorów tarczowych skokowych występujące w trzech obszarach wynosi od 17 do 27% w stosunku do wyznaczonego reflektora tarczowego ciągłego, natomiast podwyższenie czułości stwierdzone w dwóch obszarach grubości wynosi od 25 do 33%.

#### 4. Podsumowanie

Wyznaczenie reflektora odniesienia w funkcji grubości materiału oraz porównanie jego czułości względem przyjętych w normie PN-EN ISO 17640 reflektorów o zależności skokowej wykazało istotny wpływ na dokładność oceny w badaniach ultradźwiękowych złączy spawanych. Stwierdzona obniżona czułość reflektora odniesienia w przedziale małej grubości 8 – 25 mm jest niepokojąca i ma bezpośredni wpływ na obniżenie dokładności w ocenie. W zakresie dużych grubości natomiast, szczególnie w przedziale 55 – 100 mm, wzrost czułości reflektora odniesienia podwyższa dokładność w ocenie, co można uznać za nieuzasadnione. Największe zmiany czułości badania występują w otoczeniu grubości 15 mm i 40 mm i są bezpośrednio związane ze skokową zmianą reflektora odniesienia. Charakterystyka zmian czułości reflektora odniesienia ma bezpośredni wpływ na dokładność oceny z uwagi na ściśle powiązanie między poziomem odniesienia wyznaczonym na podstawie reflektora odniesienia, a poziomami akceptacji stosowanymi w ocenie badanych złączy spawanych wg PN-EN ISO 11666.

#### 5. Literatura/References

- [1] PN-EN ISO 17640:2019-01; Badania nieniszczące spoin - Badania ultradźwiękowe - Techniki, poziomy badania i ocena.
- [2] PN-EN ISO 11666:2018-04; Badania nieniszczące spoin - Badania ultradźwiękowe - Poziomy akceptacji.
- [3] PN-EN ISO 4136:2013-05; Badania niszczące złączy spawanych metali - Próba rozciągania próbek poprzecznych.
- [4] PN-EN 10025-1:2007; Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych - Część 1: Ogólne warunki techniczne dostawy.
- [5] Krawczyk R., Luto M., Wojtas P.: „Analiza dokładności oceny niezgodności spawalniczych wykrywanych w badaniach ultradźwiękowych”, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, Vol. 54, nr 3/2010, s. 40÷45.