

Bogusław Ładecki<sup>1\*</sup>, Łukasz Knysak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>AGH w Krakowie, KWZMiK

<sup>2</sup>BW Engineering Sp. z o.o., Kraków

# Badania nieniszczące połączeń lutowanych rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych

## Non-destructive testing of brazing joints of thin walled non-ferromagnetic steel pipes

### ABSTRACT

The paper discusses methods used in non-destructive testing of joints of thin walled non-ferromagnetic steel pipe, brazed using binders based on silver and nickel. A comparative study made using the radiographic and ultrasonic method has shown, that it is possible to use ultrasonic technique in defining quality levels for joints of brazing thin walled pipes.

**Keywords:** non-destructive testing, brazing, thin walled non-ferromagnetic pipes

### STRESZCZENIE

W referacie omówiono problematykę badań nieniszczących złączy rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych lutowanych lutem twardej z wykorzystaniem spoiwa na bazie niklu oraz srebra. Badania porównawcze wykonane z wykorzystaniem metody radiograficznej i ultradźwiękowej, wykazały możliwość wykorzystania techniki ultradźwiękowej przy określaniu poziomów jakości złączy lutowanych na twardo rur cienkościennych.

**Słowa kluczowe:** badania nieniszczące, lutowanie twarde, rury cienkościenne ze stali nieferromagnetycznych

### 1. Wstęp

Lutowanie twarde rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych jest procesem wykorzystywanym min. w przemyśle lotniczym [1,2,3].

Elementy rur cienkościennych do lutowania twardego powinny posiadać szczelinę kapilarną o szerokości w zakresie  $0,02 \div 0,08$  mm [1,2].

Materiały łączone są spoiwem o temperaturze topnienia niższej od temperatury topnienia materiału rodzimego, a połączenie następuje w wyniku zjawisk dyfuzji.

Na jakość wykonania złączy istotny wpływ ma proces technologiczny przygotowania części do lutowania. W pewnych obszarach połączeń szczelina może być za mała, powodując utrudnienie płynięcia frontu lutu, lub zbyt duża, czego skutkiem jest zanik tzw. efektu kapilary. Spowodowane jest to niewielkimi odkształceniami elementów cienkościennych w procesie obróbki cieplnej. W efekcie, w obszarze połączenia lutowanego pojawić się mogą liczne niezgodności określone z normie PN-EN ISO 18279:2008 [4], ze względu na rodzaj, kształt i ich położenie w złączu. Norma wprowadza kryteria oceny i poziomy jakości, których wykorzystanie w odniesieniu do złączy lutowanych rur cienkościennych nie jest zweryfikowane odpowiednio obszernym zakresem badań eksperymentalnych.

Praktyka eksploatacyjna wskazuje na różne szczególnie szkodliwe niezgodności dla rozważanych złączy, z których większość usytuowana jest równolegle do powierzchni połączenia [5], a jednymi z najistotniejszych są rozległe braki wypełnienia złącza lutem [2].

### 2. Badania nieniszczące połączeń lutowanych

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12799:2003 [6] w badaniach jakości połączeń lutowanych zaleca się stosowanie konwencjonalnych metod badań nieniszczących tj.: metoda wizualna, penetracyjna, radiograficzna, ultradźwiękowa i termograficzna.

Podstawowym kryterium kwalifikacji w ocenie jakości połączeń lutowanych rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych jest stopień wypełnienia złącza lutem obliczony w odniesieniu do długości złącza, który powinien wynosić co najmniej 80% [2].

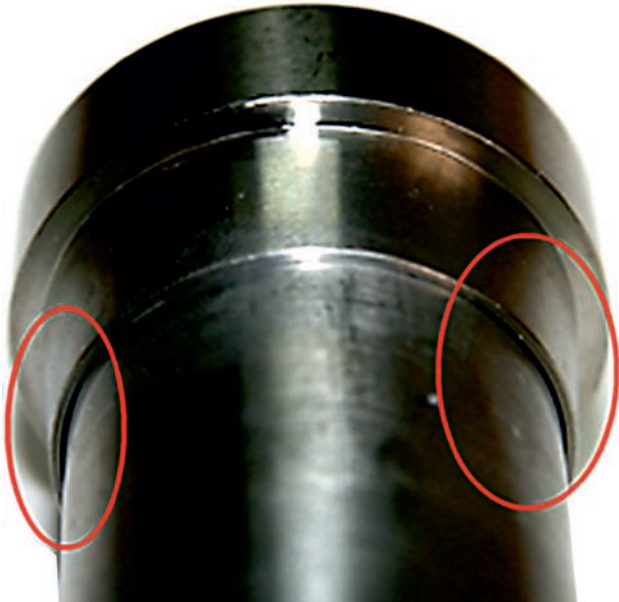
Badania wizualne połączeń lutowanych rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych, ze względu na ich specyfikę, wykonuje się zwykle dla wszystkich złączy na całej ich długości [1,2]. Jednym z podstawowych wymagań dla tego typu złączy jest całkowite wypełnienie szczeliny lutem i uzyskanie ciągłego menisku lutu wewnątrz i na zewnątrz złącza rurki. Przykładowe braki wypełnienia połączenia lutowanego lutem na bazie srebra pokazano na rys. 1.

Polepszenie wykrywalności niezgodności powierzchniowych tj. porowatość, niepełne wypełnienie, brak zwilżenia czy pęknięcia, w porównaniu do metody wizualnej, daje metoda penetracyjna [9]. Należy zwrócić jednak uwagę na fakt, że całkowite usunięcie pozostałości penetranta może być trudne lub niemożliwe. Obecność penetranta pozostałego w złączu spowodować może utrudnienie rozpylania lutownicy, w przypadku wykonywania kolejnych prac lutowniczych.

W przypadku złączy lutowanych rur o małych średnicach, wykonanie obu wzmiankowanych powyżej badań wnętrza rur może nie być możliwe do wykonania.

\*Autor korespondencyjny. E-mail: boglad@agh.edu.pl

Podstawową metodą badania stosowaną do oceny jakości złączy lutowanych rur jest metoda radiograficzna. Stosowane aktualnie nowoczesne aparaty rentgenowskie, pozwalają na przeprowadzenie zautomatyzowanej oceny jakości połączeń lutowanych [7].



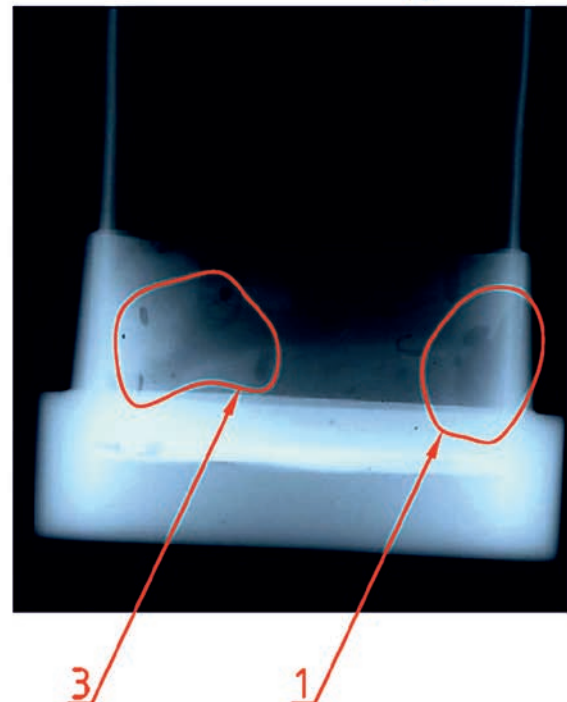
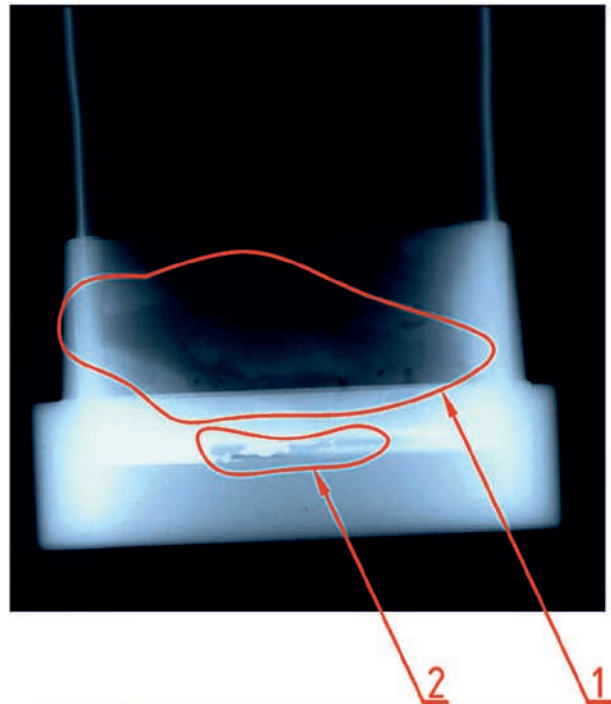
Rys. 1. Widok połączenia lutowanego lutem na bazie srebra z brakiem wypełnienia szczeliny lutem od strony zewnętrznej próbki.  
Fig. 1. View of the brazing joints with a silver-based solder with no gap filling with solder from the outside of the sample.

Badania radiograficzne wykonane dla złączy rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznej gatunku 0H18N9T o średnicach  $\varnothing 25,4$  mm i  $\varnothing 9,5$  mm, lutowanych dla rur o większej średnicy lutem na bazie srebra Bag-13a oraz dla rur o mniejszej średnicy lutem na bazie niklu BNi-2. Przyłutowane końcówki w miejscu występowania połączenia lutowanego mają na powierzchni kształt ściętego stożka o tworzącej nachylonej pod kątem  $3^\circ$  do osi rury. Przykładowe radiogramy wykonane w dwóch różnych pozycjach dla jednej z próbek lutowanych lutem na bazie srebra, z opisem wykrytych niezgodności pokazano na rys. 2.

Znacznie rzadziej w badaniach złączy lutowanych rur cienkościennych stosowana jest technika ultradźwiękowa. Złącza takie składają się zwykle z trzech warstw materiałów o zróżnicowanych własnościach akustycznych. Biorąc pod uwagę konieczność dopasowania głowicy do kształtu badanej powierzchni, jak również duże rozmiary ziarna w obszarze złącza lutowanego rur wykonanych ze stali nierdzewnej [8], interpretacja uzyskanych wskazań oraz wykonanie ich oceny napotkać może na problemy [8,9]. Najnowsze badania wskazują na możliwość dokonywania oceny jakości obwodowych złączy zgrzewanych rur cienkościennych ze stali austenicznych [8]. Wcześniejsze publikacje również wskazują na możliwość prowadzenia badań takich rur z wykorzystaniem tradycyjnych przetworników ultradźwiękowych [10].

Do wykrycia niezgodności w rozważanych złączach lutowanych wykorzystano miniaturową głowicę podwójną typu DA412 o średnicy przetwornika  $\varnothing 5$  mm. Badania wykonane

dla próbek lutowanych lutem na bazie srebra wykazały dobrą zgodność uzyskanych wskazań rozległych w porównaniu do wyników badań metodą radiograficzną.



Rys. 2. Radiogramy złącza lutowanego spoiwem na bazie srebra z obszarami występowania nieciągłości: 1 – obszary niedolutowania, 2 – obszar niedolutowania na powierzchni lutownicy, 3 – obszar niedolutowania z pęcherzami gazowymi.

Fig. 2. X-ray Image of a joint brazed with a silver-based braze with areas of discontinuity: 1 - non-soldering areas, 2 - non-soldering area on the surface of solder, 3 - non-soldering area with gas bubbles.

Badania metodą termograficzną nie są zbyt często stosowane w odniesieniu do połączeń lutowanych, co związane

jest z trudnościami w ilościowej ocenie stopnia wypełnienia złącza lutowanego.

### 3. Podsumowanie

Spełnienie wysokich wymagań jakościowych stawianych w procesie wykonania połączeń lutowanych lutami twardeymi rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznych związane jest z koniecznością wykonania odpowiednich odbiorczych badań nieniszczących złączy.

Metoda wizualna wykorzystywana jest do kontroli całkowitego wypełnienia szczeliny lutem i uzyskania ciągłego menisku lutu wewnątrz i na zewnątrz rurki na styku z końcówką. Znacznie większą niezawodność wykrywania niezgodności powierzchniowych, w porównaniu do metody wizualnej, daje metoda penetracyjna. Całkowite usunięcie pozostałości penetranta może być jednak trudne lub niemożliwe, co stanowić może problem w przypadku konieczności wykonania powtórnego lutowania, a dla połączeń lutowanych rur o małych średnicach przeprowadzenie zarówno badań wizualnych, jak i penetracyjnych wnętrza rur może być niemożliwe do wykonania.

Podstawową metodą badania złączy lutowanych rur jest metoda radiograficzna, która w wyniku zastosowania nowoczesnych technologii obróbki obrazów pozwala na wykonanie dokładnej oceny poziomu jakości złączy.

Znacznie rzadziej w badaniach złączy lutowanych rur cienkościennych wykorzystywana jest technika ultradźwiękowa. W związku z badaniem struktur wielowarstwowych oraz koniecznością dopasowania głowicy do kształtu badanej powierzchni, interpretacja uzyskanych wskazań oraz wykonanie ich oceny napotkać może na problemy.

Badania wykonane techniką ultradźwiękową, zweryfikowane badaniami radiograficznymi, wskazują na możliwość wykorzystania techniki ultradźwiękowej w ocenie jakości połączeń lutowanych lutem twardym rur cienkościennych ze stali nieferromagnetycznej o określonej geometrii złączy. Zastosowane specjalistycznych miniaturowych głowic

ultradźwiękowych o powierzchni styku dostosowanej do geometrii badanych rur wpłynąć może na podwyższenie dokładności oceny jakości takich połączeń.

### Podziękowania

Artykuł powstał w ramach realizacji pracy statutowej Katedry Wytrzymałości Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji WIMiR AGH pt. Wytrzymałość Materiałów i Konstrukcji - praca nr 11.11.130.375.

### 4. Literatura / References

- [1] T. Babul, J. Baranowski, J. Jakubowski, J. Kopeć, S. Kowalski, J. Senkara: Wpływ czynników technologicznych na lutowanie stali 18-8 spoiwem AgCu42Ni2. Przegląd Spawalnictwa, nr 8-9, s. 53-56, 2004
- [2] J. Baranowski: Lutowanie twarde części w przemyśle lotniczym. Przegląd Spawalnictwa, nr 8-9, s. 57-59, 2004
- [3] J. Baranowski: Lutowanie twarde w wybranych zastosowaniach w produkcji lotniczej. Przegląd Spawalnictwa, nr 9, s. 25-28, 2016
- [4] PN-EN ISO 18279:2008 - Lutowanie twarde – Niezgodności w złączach lutowanych na twardo.
- [5] A. Winiowski: Niezgodności złączy lutowanych spoiwami twardymi i przyczyny ich powstawania. Przegląd Spawalnictwa, nr 6, s. 37-41, 2012
- [6] PN-EN 12799:2003+A1:2005 - Lutowanie twarde – Badania nieniszczące złączy lutowanych na twardo.
- [7] A. Ambroziak, P. Białucki, W. Derlukiewicz, A. Lange, J. Chmielewski: Weryfikacja jakości połączeń lutowanych z miedzi za pomocą badań rentgenowskich. Przegląd Spawalnictwa, nr 9, s. 91-94, 2016
- [8] M. Węglowski: Badania ultradźwiękowe złączy zgrzewanych metodą FST o grubości poniżej 8mm. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, nr 2, s. 13-17, 2018
- [9] A. Łosieczka, L. Sozański: Wybrane aspekty badań ultradźwiękowych miedzianych połączeń lutowanych. Przegląd Spawalnictwa, nr 9, s. 85-88, 2010
- [10] M. Stachurski: Badania ultradźwiękowe cienkościennych elementów i ich połączeń. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, nr 6, s. 29-36, 2006