

Adam Wocial*

BTW Instytut Gamma Sp. z o.o., Dębe Wielkie

Badania prądami wirowymi połączeń spawanych – wpływ doboru warunków i parametrów badania na czułość i wiarygodność metody – przykłady zastosowań

Eddy current tests of welded joints - the impact of selection of test conditions and parameters on the sensitivity and reliability of the method - examples of applications

ABSTRACT

The article presents a practical approach in the application of the eddy current method in cases outside the scope and recommendations of EN/ISO 17643: 2015 [1] regarding the testing of eddy currents of welded joints. This standard does not explicitly limit the scope of application to specific materials and welding methods, but gives e.g. recommendations regarding calibration standards, probe construction and test parameters. Such a situation may cause misunderstanding and a number of wrong decisions affecting the result of the examination. The article gives several examples of eddy current testing of welded joints where a completely new approach was required that went far beyond the aforementioned standard, e.g. testing of aluminum welds, duplex steel, metallic coatings, and electron beam welding.

Keywords: eddy current welds examination, eddy current array, duplex stainless steel, metalized metallic cladding layer, electrical conductivity, SCC stress corrosion cracking, and electron beam welding

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowane jest praktyczne podejście w zastosowaniu metody prądów wirowych w przypadkach wykraczających poza zakres i zalecenia normy EN ISO 17643: 2015[1] dotyczącej badania prądami wirowymi połączeń spawanych. Norma ta nie ogranicza wyraźnie zakresu stosowania do konkretnych materiałów i metod spawania, natomiast podaje np. zalecenia dotyczące wzorców kalibracyjnych, budowy sond i parametrów badania. Sytuacja taka może powodować niezrozumienie i szereg błędnych decyzji wpływających na wynik badania. W artykule podano kilka przykładów badania prądami wirowymi połączeń spawanych, gdzie wymagane było zupełnie nowe podejście wykraczające daleko poza wspomnianą normę jak np. badanie spoin stali duplex, aluminium, badania poprzez powłoki metaliczne czy np. spawanie wiązką elektronów.

Słowa kluczowe: prądy wirowe, badania prądami wirowymi sondami mozaikowymi, połączenia spawane wiązką elektronów, duplex, inconel, warstwy napawane, metaliczne powłoki ochronne, pęknięcia korozji naprężeniowej

1. Wstęp

Metoda badania prądami wirowymi jest już obecnie uznana w pełni i powszechnie stosowaną jedną z kilku tzw. powierzchniowych metod kontroli nieniszczącej.

Wzrost zastosowania tej metody w badaniach nieniszczących oraz jednoczesny rozwój innych metod elektromagnetycznych obok zaawansowanej techniki ultradźwiękowej Phased Array i TOFD jest największy spośród wszystkich metod NDT. Ciągły postęp techniczny wymuszany przez bardzo wysokie wymagania techniczne, wprowadzanie nowych materiałów konstrukcyjnych i technologii łączenia materiałów w połączeniu z wysokimi wymaganiami jakościowymi i niezawodności wymusza postęp również w badaniach NDT. Metoda prądów wirowych rozpoczęła swoją drogę wchodzenia w zakres usług głównie w przemyśle lotniczym, lecz dzisiaj jest już powszechna w każdej

dziedzinie przemysłu jak stalowy, samochodowy, energetyczny, naftowy i w tym oczywiście off-shore.

Norma EN/ISO 17643 w swej zawartości określa jedynie podstawowe zasady wymagane podczas badania metodą prądów wirowych połączeń spawanych. Badania te skierowane są głównie do kilku tradycyjnych metod spawania: elektryczne elektrodą otuloną, MIG/MAG, TIG oraz spawanie pod topnikiem, gdzie występuje klasyczny przekrój spoiny, kształt lica spoiny doczołowej lub pachwinowej oraz charakterystyczna strefa wpływu ciepła. Jeśli chodzi o materiały spawane to są to głównie stale ferrytyczne niskowęglowe oraz austenityczne wysokostopowe. Praktyka przemysłowa stawia natomiast nowe wyzwania poprzez rozszerzenie badań na połączenia spawane materiałów ferrytycznych, lecz o bardziej skomplikowanej mikrostrukturze jak np. duplex, inconel oraz stopy metali kolorowych i spoiny materiałów różnorodnych oraz coraz bardziej powszechne powłoki metaliczne np. nanoszone plazmowo. Również badania

*Autor korespondencyjny. E-mail: adamwoc@pro.onet.pl

prądami wirowymi są coraz częściej stosowane do metody spawania jak elektronowe, laserowe czy tarciove (FSW)

W związku z opisanymi zmianami rodzą się zatem wątpliwości, jak dobrać parametry i całą technikę badania, jak ustalać kryteria akceptacji i czy w ogóle można powoływać się na wspomnianą na początku normę w dokumentacji wykonawczej i raportach z badania. W takich wypadkach o ustaleniu warunków badania i odbioru należy zasięgać opinii specjalistów posiadających doświadczenie i kwalifikacje 3 stopnia, szczególnie w metodzie prądów wirowych.

Dokumentem opisującym takie szczególne sytuacje powinna być procedura dla metody prądów wirowych, nieuniwersalna w oparciu o normę EN/ISO 17643, lecz opracowana dla konkretnego przypadku.

2. Podstawowe parametry i wielkości badania

Generowanie prądów wirowych zależy od pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez cewkę wzbudzącą oraz od właściwości elektromagnetycznych materiału poddanego badaniu. Materiał badany cechują pod tym względem głównie: konduktywność oznaczana symbolem σ (Sigma), dla której podstawową jednostką jest S/m (Simens/metr) oraz przenikalność magnetyczna μ , dla której jednostką jest H/m (Henr/metr). Zależą one od składu chemicznego, kompozycji tych składników, technologii spawania, przeróbki plastycznej, naprężeń i temperatury. Następstwem znajomości tych parametrów jest konstrukcja sond badawczych (parametry: indukcyjność $L(\mu\text{H})$, wymiar cewki $D(\text{mm})$, konfiguracja cewek, częstotliwość $f(\text{Hz})$, wzbudzenie (V) i wzmocnienie $G(\text{dB})$ w taki sposób, by spełnić wymagania dotyczące czułości badania i otrzymać wiarygodne wyniki.

Na podstawie tych danych oblicza się najważniejszą wielkość podczas badania prądami wirowymi, czyli SDP - Standardową Głębokość Wnikania prądów wirowych oraz Efektywną Głębokość Wnikania prądów wirowych - EDP (Tablica 1). W rzeczywistości problem jest jednak bardziej skomplikowany, jeśli mamy do czynienia z mikrostrukturami mieszanymi pod względem cech elektromagnetycznych. W takich przypadkach wszelkie procedury specjalne powinny zostać zweryfikowane poprzez testy, czy pewien proces walidacji, za pomocą wzorców kalibracyjnych odzwierciedlających specyficzne warunki badania.

Tab. 1. Wartości konduktywności i przenikalności magnetycznej oraz Standardowa i Efektywna Głębokość Wnikania prądów wirowych dla podstawowych metali.

Tab. 1. Conductivity and magnetic permeability values as well as Standard Depth of Penetration for Eddy Current for few common metals.

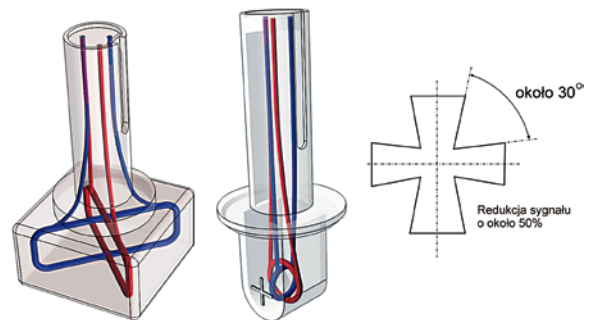
Lp.	Materiał	σ	μ	f=20kHz		f=100 kHz		f=1 MHz	
		%IACS	Henr/metr	SDP	EDP	SDP	EDP	SDP	EDP
1	Stal nisko-węglowa	10-18	800		1,00*		0,50*		0,20*
2	Stal 18-8	2,5-2,9	1,003	3,02	9,06	1,35	4,05	0,43	1,29
3	Duplex 2205	20	2700-20000		>0,1*		>0,1*		>0,1*
4	Inconel 625	1,2		3,1*	9,4*	1,4*	4,2*	0,4*	1,3*
5	Aluminium 2024	46-49	0,00002	0,58	1,74	0,26	0,78	0,08	0,24
6	Nikiel	10-18	0,0007		2,7*		1,2*		0,3*
7	Tytan	1,2	1	3,15	9,45	1,41	4,23	0,45	1,35

* - wielkość orientacyjna

3. Budowa sond do badania połączeń spawanych oraz wymagania aparaturowe

Właściwy dobór sondy często specjalnie zaprojektowanej i defektoskopu do prądów wirowych ma największy wpływ na czułość i dokładność wyników badania. Podczas badania metodą prądów wirowych występujące zjawiska, takie jak efekt oddalenia i krawędziowy oraz kłopotliwy wpływ zmian przenikalności magnetycznej są uznane za niepożądane. Sondy do badania połączeń spawanych są zbudowane najczęściej jako różnicowe lub refleksyjne. Stosuje się do nich określenie „Weldscan” lub „ \oplus Point” (Rys. 1). Wymiary średnicy sondy wahają się w zakresie od 5 mm do 25mm i mają kształt owalny lub płaski. Pole elektromagnetyczne sondy posiada kształt krzyża i jest odpowiednikiem obszaru badanego.

Skaning takimi sondami jest jednak czasochłonny i wymaga dużego skupienia operatora. Pomimo wszystko badanie posiada szereg bardzo istotnych zalet nad badaniami metodą magnetyczno-proszkową i penetracyjną. Wymagania odnośnie defektoskopu zakładają jedynie, aby posiadał analizę fazową impedancji i podstawowy zakres częstotliwości pracy.



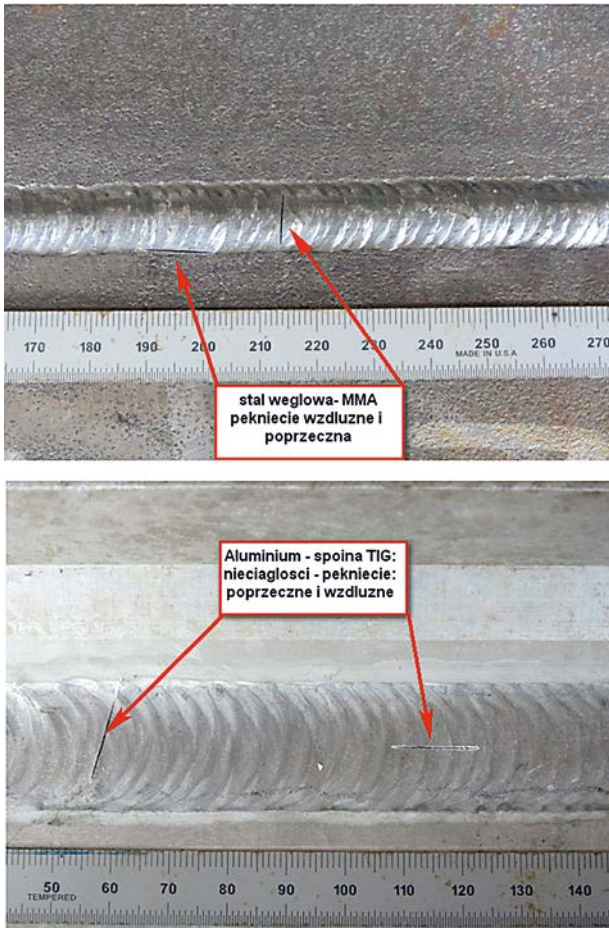
Rys. 1. Budowa klasycznych sond do badania połączeń spawanych, kształt strefy aktywnej.

Fig. 1. Construction of classic weldscan probes, shape of the active zone.

4. Identyfikacja materiału badanego i wpływ podstawowych parametrów badania

Norma EN/ISO-17643: 2015 generalnie obejmuje swym zakresem połączenia spawane wszystkich metali i ich stopy: ferromagnetyczne i nieferromagnetyczne. Podczas badania

prądami wirowymi połączeń spawanych jest dla nas bardzo ważne, jaki materiał będziemy badać, w jakim jest on stanie i jakie ma podstawowe parametry magnetyczne i elektryczne. Od tego zależy bowiem przebieg trajektorii sygnału, łatwość jego interpretacji i wykrywalność nieciągłości materiałowych. Badanie spoin związanych jest z wieloma cechami badanego materiału mającymi duży wpływ na właściwą interpretację: zmiany strukturalne, stopiwa, twardości, kształtu nadlewu i grani, grubości przy cienkich elementach.

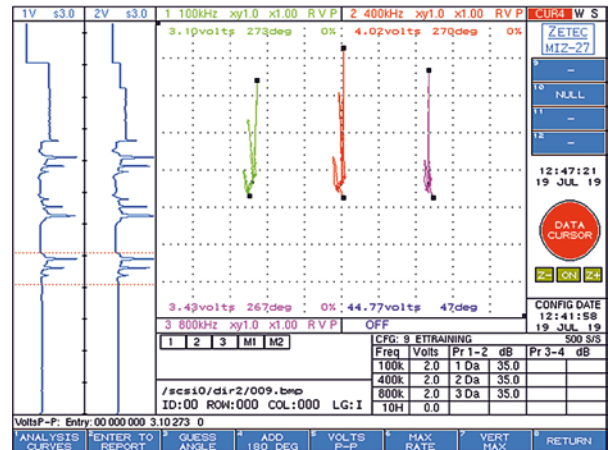


Rys. 2. Wzorzec kalibracyjny do prądów wirowych wykonany z fragmentu spoiny doczołowej dla stali węglowej oraz dla stopu aluminium. Spawanie metodą TIG.
Fig. 2. Calibration standard for Eddy current examination made of butt TIG welded fragment for carbon steel and aluminum alloy.

Jako wzorzec kalibracyjny norma zaleca płytkę obrobioną mechanicznie z 3 nacięciami o głębokości 0,5; 1,0 i 2,0 mm. Zastosowanie takiego wzorca wystarcza do podstawowej stali węglowej, lecz już w tym momencie mogą nastąpić niezgodności nie tylko z różnicami chropowatości, lecz bardziej ze zmianami przenikalności magnetycznej materiału rodzimego (próbki referencyjnej) z materiałem spoiny. Problem ten narasta znacznie w przypadku stali węglowych niskostopowych oraz wysokostopowych ferromagnetycznych, austenitycznych czy o mikrostrukturach mieszanych. Również sytuacja taka nie jest do końca obojętna np. dla stopów aluminium lub tytanu. Zalecane wzorce kalibracyjne do ET powinny być wykonane na próbkach z naturalnymi

spoinami, zarówno do stali węglowej, jak materiałów nieferromagnetycznych (Rys. 2).

Zakres zalecanej częstotliwości pracy sondy norma podaje od 1 kHz do 1 MHz. Producenci sond w tym przypadku proponują znacznie węższy zakres częstotliwości. Ma to swój wpływ na uzyskanie korzystnego stosunku S/N, czyli sygnału do szumów. W przypadku aluminium lepsze efekty daje stosowanie niższych częstotliwości aniżeli dla stali węglowych niskostopowych w celu zmniejszenia poziomu sygnałów od nierówności lica. (Rys. 3).



Rys. 3. Wskazania od wady 0,5 mm dla wzorca ze stopu Al i dla częstotliwości 100, 400 i 800 kHz z zakresu sondy typu „weldscan” zaprojektowanej na 100-800 kHz.

Fig. 3. 0,5 depth aluminum alloy defects indication for frequencies: 100, 400, and 800 kHz. Weldscan probe designed for 100-800 kHz range.

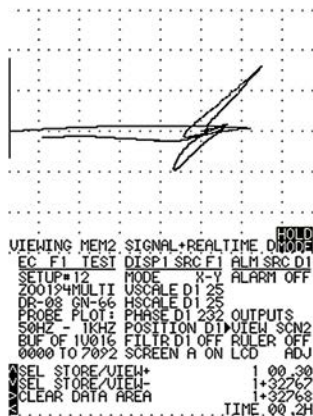
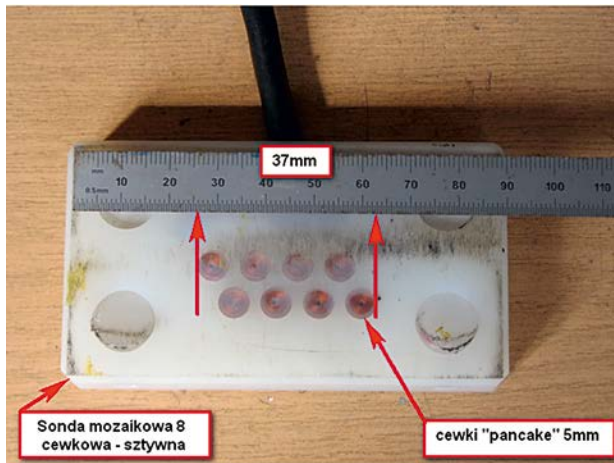
5. Badanie spoin i materiału rurociągów pod kątem występowania pęknięć korozji naprężeniowej

W latach 80. ubiegłego wieku w związku z powszechną budową gazociągów przesyłowych nasilił się problem pęknięć w wyniku korozji naprężeniowej. Zjawisko było to bardzo powszechne i szeroko omawiane na przykładzie rurociągów w Kanadzie i na Alasce. [2] Ponieważ warunki środowiskowe były bardzo ciężkie do prowadzenia badań powierzchniowych MT i PT opracowano specjalne sondy do prądów wirowych, współpracujące w oparciu o defektoskopy klasyczne pracujące z sondami typu „weldscan”. Miały one podstawową zaletę, że szerokość skanowania wynosiła 37 mm, a nie 12. (Rys. 4) Cewki w sondzie pracowały w układach różnicowych, lecz jako cewki płaskie typu „pancake”. Pomimo że cała sonda była sztywna, pozwalało to na skanowanie spoiny, jak również materiału podstawowego rury. Warunki badania prądami wirowymi zostały ustalone i weszły w zakres wymagań opisanych w normie ASME B31.8 [4].

6. Badanie połączeń spawanych z powłokami ochronnymi metalicznymi: aluminium i cynkowymi

Często występującą sytuacją jest badanie spoin pokrytych warstwami ochronnymi przewodzącymi prąd elektryczny np. cynk, aluminium, ołów, nikiel, chrom, jak i nieprzewodzącymi prądu elektrycznego np. farby, tworzywa sztuczne,

gumy. Powłoki niekonduktywne nie stanowią większego problemu podczas badania spoin. Powodują jedynie nieznaczne osłabienie sygnału spowodowane efektem oddalenia. Powłoki ochronne przewodzące wymagają natomiast od personelu badającego znacznie większego doświadczenia i specjalistycznego przeszkolenia. Częściowo temat ten był omawiany wcześniej w artykule prezentowanym w Przeglądzie Spawalnictwa [4].



Rys. 4. Sonda mozaikowa 8 cewkowa sztywna oraz obraz sygnału od pęknięcia o głębokości 0,5 i 20 mm długości.

Fig. 4. Rigid 8 coil mosaic probe and image of crack signal 0,5 depth and 20 mm length.

Badanie połączeń spawanych z powłokami ochronnymi metalicznymi, zwłaszcza nanoszonymi na gorąco, np. plazmowo, wymaga przede wszystkim wzorców kalibracyjnych (Rys. 5) dokładnie odpowiadających występującej sytuacji pod względem materiałów badanych, technologii spawania oraz techniki nakładania powłok ochronnych. Kombinacja zmian przenikalności materiału podłoża i spoiny miesza się ze zmianami konduktywności nieferromagnetycznej warstwy wierzchniej.

Wartość SDP jest wynikiem przenikalności magnetycznej materiału podłoża i konduktywności powłoki ochronnej. Amplitudy sygnału dla pęknięć o różnych głębokościach nie mają już relacji liniowej, a dodatkowo przy stosowaniu niższych częstotliwości badania, te relacje bardzo się zmieniają z powodu dominującego wpływu zmian przenikalności magnetycznej podłoża.

Charakterystycznym zjawiskiem jest zmniejszenie

amplitudy sygnału w stosunku do wad płytszych. Amplituda od pęknięcia o głębokości 1,0 mm nie jest 2 razy większa od amplitudy o głębokości 0,5mm, co może spowodować istotne błędy podczas ustawiania czułości badania. (Rys. 6) Dobór parametrów badania ma bardzo istotny wpływ na odseparowanie sygnału wady od sygnałów zmian strukturalnych oraz geometrycznych spoiny i powłoki. Badanie prądami wirowymi w tym wypadku wymaga większego doświadczenia i kwalifikacji personelu. Do badania konieczne są próbki odniesienia z identycznym układem geometrycznym i strukturalnym połączenia spawanego. Możliwa wówczas oprócz wykrywania pęknięć w spoinach jest ocena stanu technicznego i wykrywanie mikropęknięć w samej powłoce.



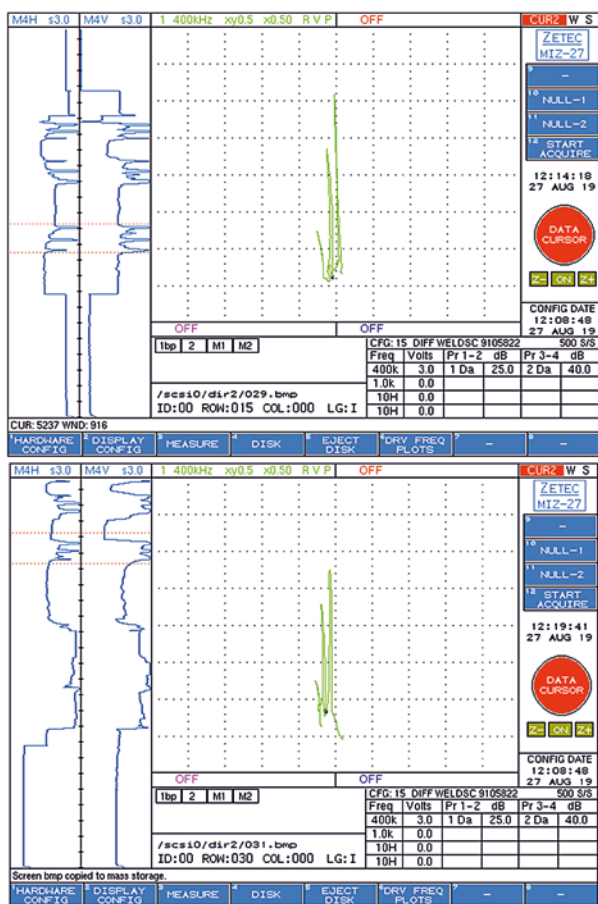
Rys. 5. Wzorce kalibracyjne z powłoką metaliczną cynkową: nałożoną na wcześniejsze nacięcia (pęknięcia pod warstwą ochronną) i nacięcia przebiegające przez powłokę cynkową oraz wzorec ze stali niskowęglowej z powłoką aluminiową.

Fig. 5. Calibration standards with metallic zinc coating: applied to earlier cuts (cracks under protective layer) and cuts through the zinc coating and a low carbon steel pattern with aluminum coating.

7. Badanie prądami wirowymi połączeń spawanych ze stali duplex 2205

Norma EN/ISO 17643, jak wspomniano, odnosi się praktycznie do stali węglowych i niektórych nierdzewnych, niestety nie wspominając o zagrożeniach podczas badania innych wysokostopowych materiałów. Sytuacja się jednak komplikuje, gdy mamy do czynienia ze stalami o strukturze mieszanej ferrytycznej i austenicyznej jak np. duplex oraz inconel. Duplex posiada niemagnetyczną fazę sigma oraz

austenit. Faza ferrytu jest z kolei magnetyczna. Przekłada się ta mieszanka faz na mieszkankę zmian przenikalności magnetycznej, która powoduje bardzo wyraźne zmiany impedancji obserwowanej na defektoskopie prądów wirowych. Zastosowanie sond typu weldscan, pomimo że pracują one w trybie różnicowym nie dają w tym przypadku dobrych rezultatów. Posłużono się zatem techniką z nasyceniem magnetycznym i sondami mozaikowymi przy odpowiednio zastosowanej znacznie niższej częstotliwości badania. (Rys. 8)

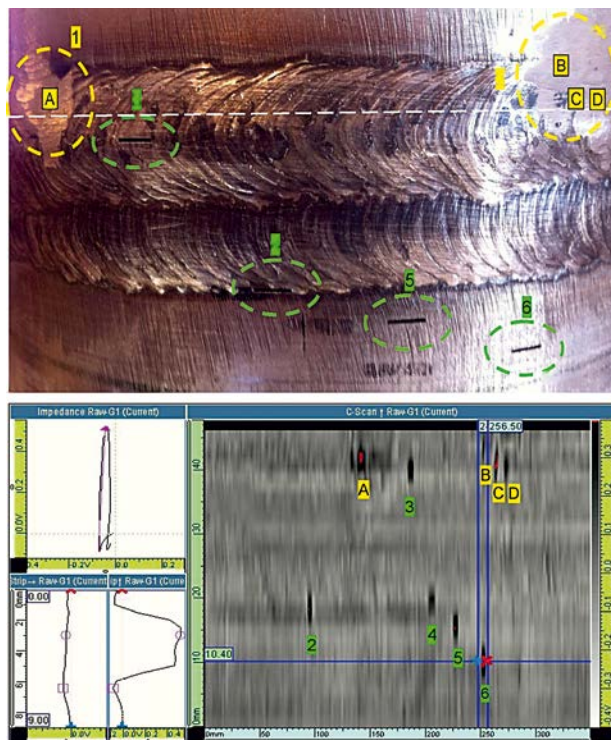


Rys. 6. Defektoskop Zetec MIZ-27SI - trajektorie wskazań od wad 0,2; 0,5 i 1,0 w spoinie z powłokami o grubości 200 µm: cynkową i aluminiową.

Fig. 6. Zetec MIZ 27-SI flaw detector – indicative trajectories from 0,2; 0,5 and 1,0 mm depth in the weld with 200 µm thick coatings: zinc and aluminum.

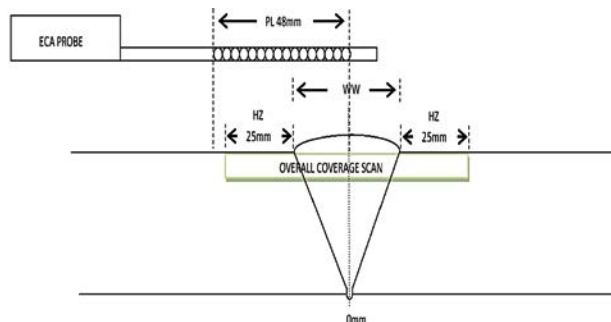
Specjalnie do tego celu zaprojektowane sondy wieloprzewodnikowe pozwoliły nie tylko na sprawny skanowanie obszaru spoiny oraz strefy wpływu ciepła, lecz również uzyskiwane czułości badania były dwukrotnie wyższe aniżeli dla sond typu weldscan.

Przedstawiony C-scan powierzchni spoiny oraz SWC przedstawia bardzo klarowny obraz powstały od naturalnego kształtu lica oraz wyraźne wskazania od nacięć kalibracyjnych. (Rys. 7). Budowa sondy już tym razem elastycznej dopasowującej się do kształtu lica (Rys. 8) oraz wykorzystanie defektoskopów wielokanałowych pozwoliło na szybkie i sprawne skanowanie lica spoiny i strefy wpływu ciepła w dwóch przejściach.



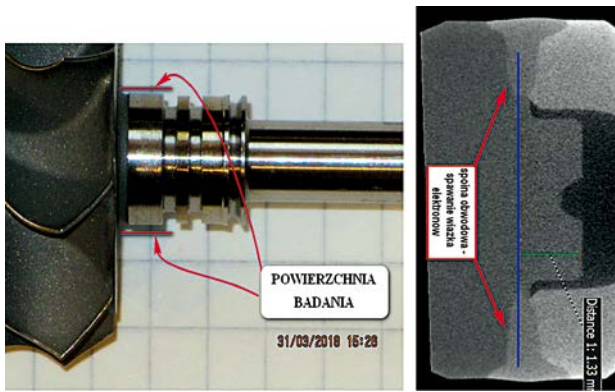
Rys. 7. Wzorec kalibracyjny z rzeczywistą spoiną ze stali Duplex 2205 i widocznymi nacięciami w spoinie i strefie HAZ oraz scan C-scan tego samego obszaru z analizą nacięcia w układzie X-Y oraz strip-charts V-H.

Fig. 7. Calibration standard with real butt weld made from Duplex 2205 and visible notches in the weld and HAZ as well as C-scan of the same area in X-Y and V-H strip chart display.

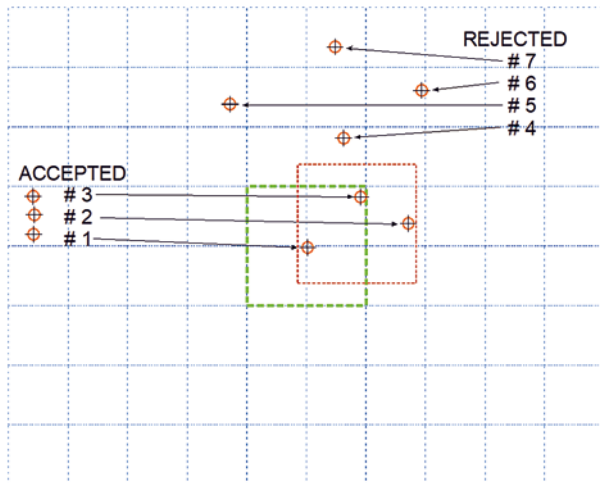


Rys. 8. Schemat lokalizacji sondy do skaningu i praktyczne badanie na rurociągu o średnicy 8 cali.

Fig. 8. Diagram of the probe location for scanning and practical weld examination on 8 inches pipeline.



Rys. 9. Badanie połączenia wykonanego wiązką elektronów wirnika z różnych materiałów ferromagnetycznych: widok fragmentu wirnika oraz przekrój wzdłużny w miejscu spoiny.
Fig. 9. Examination of the electron beam joint of the rotor made from various ferromagnetic materials: view of the rotor fragment and cross section through the weld.



Rys. 10. Wyniki badania prądami wirowymi spoiny wykonanej wiązką elektronów. Impedancja spoiny na ekranie defektoskopu jest jedynie w postaci punktu na płaszczyźnie analizy fazowej.
Fig. 10. Eddy current test results of electron beam welds. The weld impedance on the flaw detector screen is only in the form of point located on the phase analysis plane.

8. Badanie połączeń spawanych wykonanych wiązką elektronów

Badanie prądami wirowymi połączenia spawanego wiązką elektronów wymagało zupełnie innego podejścia niż zalecane w normie i omawiane powyżej. Wynikało to z założeń

przygotowania. (Rys. 9). Ponieważ całkowita głębokość spoiny nie przekraczała 2 mm jedynym rozsądnym rozwiązaniem było zastosowanie sond typu „donut” pracujących w trybie refleksyjnym. Dużym wyzwaniem podczas badania było przygotowanie zestawu wzorców kalibracyjnych z wyselekcjonowanych wcześniej i zbadanych za pomocą tomografii komputerowej elementów. Impedancja połączeń akceptowalnych znajdowały się w określonej bramce, a te, które wykroczyły poza przyjętą barierę traktowane były jak odrzucone/wadliwe. Głębsza analiza położenia impedancji pozwalała na określenie rodzaju wady, czyli przyczyny odrzucenia próbki (rys.10).

9. Wnioski

Zastosowanie metody prądów wirowych na podstawie normy EN/ISO 17643 odnosi się przede wszystkim do podstawowych stali ferromagnetycznych niskowęglowych oraz austenitycznych wysokostopowych.

Stosowanie w/w normy do innych materiałów oraz technologii spawania powinno opierać się na podstawie szczegółowej, dedykowanej procedury NDT opracowanej przez doświadczony personel o wysokich kwalifikacjach w metodzie prądów wirowych.

Zastosowanie metody prądów wirowych do badania połączeń spawanych stali o złożonej mikrostrukturze ferrytyczno austenitycznej, do badania spoin z powłokami metalicznymi nanoszonymi na gorące, czy badanie połączeń spawanych wiązką elektronów jest możliwe, lecz wymaga specjalnie projektowanych sond oraz odpowiednich wzorców kalibracyjnych

10. Bibliografia/References

- [1] ISO 17643:2015 Non-destructive testing of welds - Eddy current testing of welds by complex-plane analysis.
- [2] Stress Corrosion Cracking: a Canadian prospective for oil and gas pipelines - M.Elboujdaini, M.Shehata - CANMET Canada
- [3] Correlation between NDT measurement and sigma phase contents in duplex stainless steel - E.I.Todorov; M.G.Lozev Edison Welding Institute
- [4] ASME B31.8-2003 Gas transmission and distribution piping system
- [5] Zastosowanie metody prądów wirowych do badań połączeń spawanych z powłokami ochronnymi w oparciu o normę PN-EN 1711- A.Wocial, J.Karczmarzski, P.Mantur.-Biuletyn Spawalnictwa -2004