

Marek Śliwowski*
NDTEST Warszawa, Polska

Studium przypadków - badanie złączy austenitycznych na terminalu LNG

Case study - the study of austenitic joints for LNG terminal

ABSTRACT

In paper, in a frame of case study, the ultrasonic inspection of austenitic girth butt welds in storage tank of LNG terminal for the range of diameter till 60 m and thickness range $10 \div 40$ mm was studied.

There are presented the fundamental problems arise by ultrasonic testing of austenitic coarse grained welds. The examination technique selection based on accessible knowledge, existing standards and tests on representative weld specimen is followed through in a frame of case study.

It is presented the scan plan of testing the austenitic girth welds using conventional ultrasonic system, based on the multiprobe scanning. There is presented a range and sensitivity setting on reference block manufactured on the base of representative austenitic weld with reference reflectors dedicated to each area of interest of inspected weld volume.

It is also presented the new modern solution of scanner with only two probes. Each of them is dual matrix phase -array probe working in pitch-catch mode and cold symbolic PA DMA-TRL. They are connected with phase-array apparatus controlled localization and acquisition of experimental data. There are discussed advantages such a modern examination technique reached highest level of NDT techniques.

The presented case study is an assumption formulation example of examination procedure for technically important and responsible object - like assessment of requirements agreement with technical regulations for the austenitic welds in storage tanks of liquid gas LNG.

Keywords: case study, ultrasonic inspection, austenitic welds (austenitic welded joints), austenitic welds (seams), conventional ultrasonic pulse echo probes PE, ultrasonic twin probes of longitudinal waves TRL, ultrasonic dual matrix phase-array probes PA DMA-TRL

STRESZCZENIE

W referacie rozważono, w ramach studium przypadku, zadanie ultradźwiękowego badania doczołowych austenitycznych złączy spawanych na zbiornikach ciekłego gazu terminalu LNG, w zakresie średnic do DN 60 m oraz zakresie grubości $10 \div 40$ mm.

Przedstawiono podstawowe problemy występujące przy ultradźwiękowym badaniu austenitycznych złączy spawanych o dużej grubości ziaren w spoinach. W ramach studium przypadku prześledzono dobór techniki badania - w oparciu o dostępną wiedzę, istniejące dokumenty normatywne i badania na reprezentatywnych próbkach złączy.

Zaprezentowano plan badania obwodowych złączy spawanych zbiorników austenitycznych z wykorzystaniem konwencjonalnego ultradźwiękowego systemu badawczego, opartego na technice wielogłowicowej. Omówiony został sposób nastawiania zakresu pomiarowego i czułości badania na reprezentatywnej próbce odniesienia w postaci spoiny austenitycznej z reflektorami referencyjnymi przewidzianymi dla każdej strefy przeszukiwania.

Przedstawiono również alternatywne nowoczesne rozwiązanie skanera z dwoma głowicami ultradźwiękowymi z podwójną matrycą phase-array typu PA DMA-TRL, współpracującymi z aparaturą sterującą lokalizacją i akwizycją wyników badania. Omówione zostały zalety nowoczesnej techniki badawczej.

Prezentowane studium przypadku jest przykładem sformułowania założeń do przygotowania procedury badania obiektu dla technicznie ważnego i odpowiedzialnego zadania badawczego - ocena zgodności z wymaganiami złączy austenitycznych w zbiornikach magazynowych ciekłego gazu LNG.

Słowa Kluczowe: studium przypadku, badanie ultradźwiękowe, złącza austenityczne, spoiny austenityczne, konwencjonalne głowice ultradźwiękowe echa PE, głowice ultradźwiękowe nadawczo-odbiorcze fal podłużnych TRL, głowice ultradźwiękowe z podwójną matrycą phase-array, nadawczo-odbiorcze PA DMA-TRL.

1. Wstęp

W niniejszej pracy rozpatrzone zostaną problemy związane z badaniem złączy austenitycznych (Rys. 1) podczas konstrukcji zbiorników ciekłego gazu na terminalu LNG. Przedstawione materiały są elementem prezentacji możliwości badawczych konsorcjum badawczego Applus RTD i NDTEST przy aplikacji do projektu polskiego LNG. [1]

Termin „austenityczny” odnosi się do różnorodnych materiałów i ich kombinacji, zawierających stale wysokostopowe austenityczne oraz stopy Ni-Cr takie np. jak „Inconel”, „Incoloy”, itd.. Wykorzystanie ultradźwięków, w porównaniu do przypadku materiałów ferrytycznych, dla badania materiałów a w szczególności spoin austenitycznych jest istotnie ograniczone z wielu powodów:

- anizotropowej struktury charakterystycznej dla materiałów austenitycznych w postaci preferencyjnej orientacji

w kierunku wzrostu ziaren - na ogół wzdłuż grubości - Rys. 2. (tzw. struktury dendrytyczne);

- tworzenia się struktury odlewu w obszarze jeziorka spawalniczego spoiny;
- tworzenia się strefy przejścia pomiędzy materiałem rodzimym i materiałem spoiny (tzw. linia - granica wtopienia);
- dla spoin austenitycznych tworzenie dużych wydłużonych ziaren (do kilku mm), które nadają strukturze spoiny cechy niejednorodności - szczególnie w okolicach linii wtopienia.

Punktem wyjścia, w ramach studium przypadku - badanie złączy austenitycznych - jest pytanie: dlaczego standardowe techniki badania złączy spawanych (np. wg EN ISO 17640:2011 [2]) nie mogą być zastosowane bezpośrednio do badania połączeń typu austenitycznego? Sama struktura krystalograficzna stali austenitycznych nie stanowi istotnej przeszkody w stosowaniu standardowych technik badań ultradźwiękowych. Wiele wyrobów kutyh, walcowanych, tłoczonych czy ciągnionych

*Autor korespondencyjny. E-mail: m.sliwowski@ndtest.com.pl

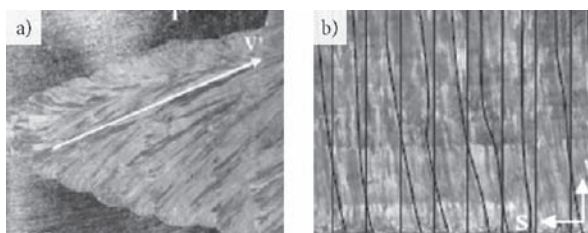
wykonanych ze stali austenitycznych bada się podobnymi technikami jak stale ferrytyczne drobno- lub średnioziarniste [3].



Rys. 1. Złącze spawane 9 % Ni – Inconel 625 - układ tekstury dendrytycznej spoiny austenitycznej w zbiornikach LNG

Fig. 1. Weld joint 9% Ni – Inconel 625 – dendritic texture arrangement in austenitic weld of LNG storage tank

Istotny problem badawczy powstaje wówczas, gdy w wyniku procesu technologicznego, w materiale austenitycznym powstaje gruboziarnista struktura dendrytyczna. Sytuacja taka ma miejsce w odlewach oraz w złączach austenitycznych wymagających dużej energii spawania. W porównaniu do stali ferrytycznych istotna różnica polega na tym, że powstająca w procesie krzepnięcia struktura gruboziarnista jeziorka spawalniczego pozostaje austenityczna i nie ulega przemianom w rozdrobniony ferryt, jak to ma miejsce podczas stygnięcia zwykłych stali ferrytycznych.



Rys. 2. Układ tekstury dendrytycznej spoiny austenitycznej spawanej w pozycji : (a) poziomej – nachylenie krystalitów około 20°; (b) pionowej – nachylenie pionowe około 90°

Fig. 2. Dendritic texture arrangement of austenitic joint welded in position: (a) lateral – crystallite inclination about 20°; (b) vertical – crystallite inclination about 90°

Struktura dendrytyczna ma charakter ukierunkowany i prowadzi do silnej anizotropii właściwości sprężystych stopiwa (Rys. 2a, 2b). W rezultacie to anizotropia struktury, obok gruboziarnistości oraz niejednorodności, jest głównym źródłem trudności w stosowaniu standardowych technik ultradźwiękowych do badań tych materiałów.

W przypadkach, gdy w procesie spawania w materiale spoiny austenitycznej zostaje zachowana lub zmieniona w niewielkim stopniu struktura drobnoziarnista badanie ultradźwiękowe może być przeprowadzone standardowymi technikami.

Struktura drobnoziarnista często pozostaje niezmienna w złączach o małej grubości, w trakcie spawania z niewielką energią liniową lub przy dużej szybkości odprowadzania ciepła. W ramach studium przypadku należy rozstrzygnąć, w oparciu o badania makro oraz testy ultradźwiękowe przeprowadzone na reprezentatywnych próbkach spoin, czy należy stworzyć specjalną procedurę badania złączy austenitycznych. Istotnym

ułatwieniem i uporządkowaniem tego problemu badawczego jest powstała niedawno norma wyrobu EN ISO 22825:2012 [4].

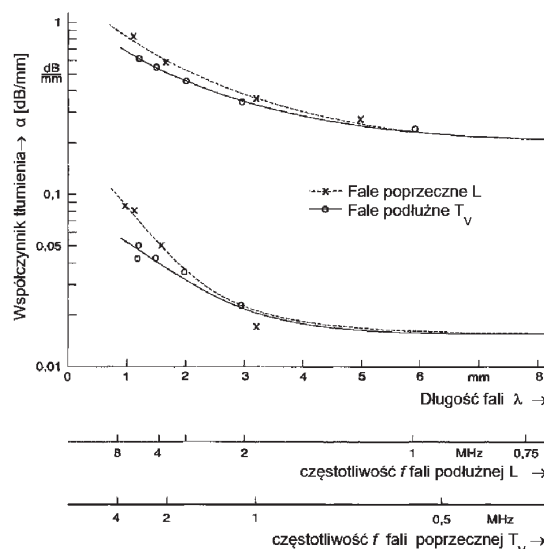
2. Konsekwencje struktury anizotropowej i gruboziarnistej dla przebiegu fal UT

Duże rozmiary ziaren powodują wzrost rozpraszania fal ultradźwiękowych na granicach ziaren, co przyczynia się do znacznego wzrostu współczynnika tłumienia jak i podwyższenia poziomu szumu strukturalnych materiału spoiny w porównaniu do materiału rodzimego [5].

Współczynnik tłumienia fal ultradźwiękowych szybko wzrasta z częstotliwością fali, zaś przy tej samej częstotliwości jest wyraźnie większy dla fal poprzecznych T_V niż podłużnych L (Rys. 3).

Materiał spoiny austenitycznej działa jak filtr dolnoprzepustowy (Rys. 4.), z charakterystyki widmowej wycinane są wyższe częstotliwości, szczególnie w miarę rosnącego przebiegu drogi fali $s = \dots$ [mm]

Parametrem głowice ultradźwiękowych, który wymaga optymalizacji w przypadku badania gruboziarnistej struktury spoin austenitycznych jest częstotliwość podstawowa głowicy oraz szerokość pasma częstotliwości. Aby zredukować negatywne efekty wywołane silnym rozpraszaniem fal ultradźwiękowych na granicach ziaren, częstotliwość fali powinna być możliwie niska, co z drugiej strony skutkuje pogorszeniem rozdzielczości zasięgowej głowicy [6].

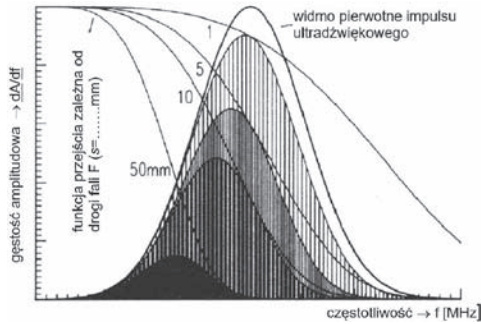


Rys. 3. Zależność tłumienia ultradźwiękowego dla fali podłużnej L i poprzecznej T_V (polaryzacja pionowa) w zależności od długości (częstotliwości) fali głowicy w stopiwie spoiny austenitycznej oraz materiale rodzimym austenitycznym - złącza spawanego

Fig. 3. Ultrasonic attenuation relationship of the L- longitudinal and T_V – transversal (vertically polarized) waves in respect to wave length (frequency) of probes used to inspection in virgin austenitic material and in austenitic seam material

Dla złagodzenia tych sprzeczności należy użyć głowice o szerokim paśmie częstotliwości, co jest korzystne z uwagi na mniejszą szybkość zaniku amplitudy impulsów podczas ich przechodzenia przez silnie tłumiący materiał. W skład szerokiego widma impulsu wchodzi bowiem również niskie częstotliwości, które są słabiej tłumione przez materiał niż częstotliwość podstawowa

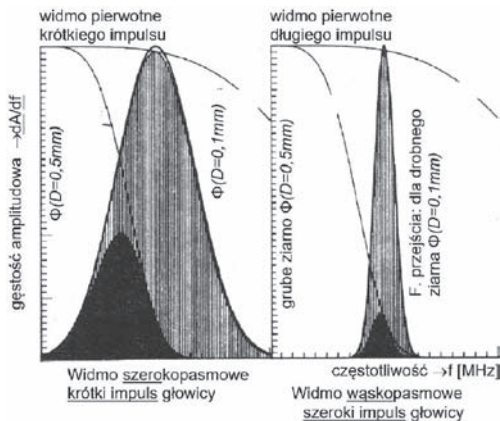
i wyższe. W efekcie widmo propagującego się impulsu szerokopasmowego ulega przesunięciu w kierunku niższych częstotliwości ale dzięki temu jego efektywne tłumienie w materiale ulega zmniejszeniu. Wpływ silnego tłumienia materiału na zmiany widma wąsko i szerokopasmowych impulsów ultradźwiękowych pokazano na Rys. 5. – dla materiałów o różnej ziarnistości.



Rys. 4. Mechanizm tłumienia charakterystyki widmowej głowicy dla rosnącej drogi przejścia s impulsu ultradźwiękowego dla gruboziarnistej tekstury spoiny austenicznej

Fig. 4. Attenuation mechanism of frequency spectrum characteristic for the increased paths s of ultrasonic pulse for the case of coarse-grained austenitic seam texture

Oprócz ogólnego pogorszenia stosunku sygnał-szum interferencje fal rozproszonych na granicach dużych ziaren mogą czasem prowadzić do powstawania wskazań pozornych (Rys. 9.).

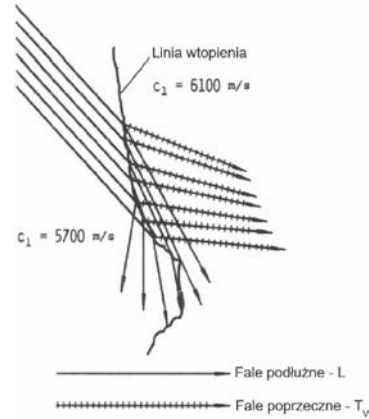


Rys. 5. Mechanizm tłumienia charakterystyki widmowej głowicy przy tej samej drodze fali: dla drobno ($D=0,1\text{mm}$) oraz grubo-ziarnistej ($D=0,5\text{mm}$) tekstury spoiny austenicznej

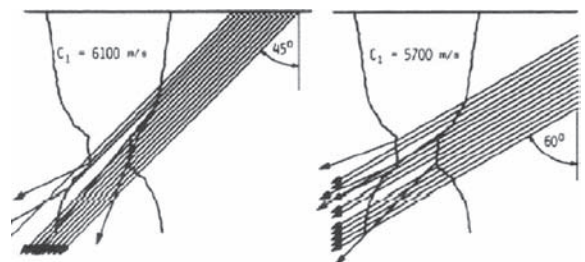
Fig. 5. Attenuation mechanism of frequency spectrum characteristic for the increased paths s of ultrasonic pulse for the case of fine- ($D=0,1\text{mm}$) and coarse-grained ($D=0,5\text{mm}$) austenitic seam texture

Anizotropia spowodowana wyróżnionym kierunkiem orientacji krystalitów słupkowych powoduje:

- kierunkową zależność prędkości fal względem tego kierunku. Zależność ta objawia się w mniejszym stopniu dla fal podłużnych L, w większym stopniu dla spolaryzowanych pionowo fal poprzecznych, TV (Rys. 6, 7);
- zwiększanie kąta rozbieżności (w porównaniu do przypadków izotropowych) i rozszczepienie wiązki zależne od kierunku wprowadzenia fali (Rys. 7);
- tworzenie się rozróżnialnej akustycznie granicy wtopienia, wywołującej zjawiska odbicia i konwersji modu fali (Rys. 6, 8.) oraz ech pozornych (Rys. 9).

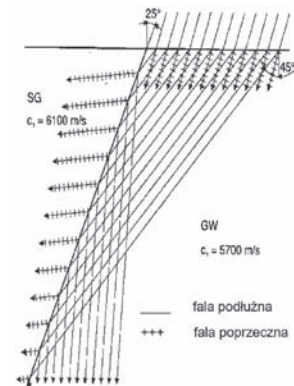


Rys. 6. Mechanizm konwersji modu fali na linii wtopienia
Fig. 6. Mode conversion of longitudinal wave on the sidewall fusion line



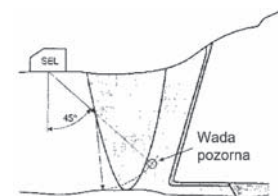
Rys. 7. Mechanizm zwiększania rozbieżności i rozszczepienia wiązki w anizotropowym materiale spoiny

Fig. 7. Increasing of divergence and decomposition of ultrasonic beam in anisotropic material of weld seam



Rys. 8. Całkowite odbicie fali podłużnej od granicy wtopienia złącza austenicznego

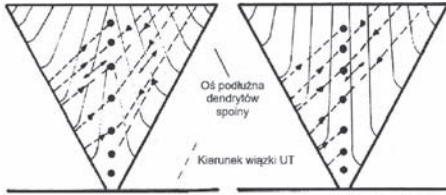
Fig. 8. Total mode conversion of longitudinal wave on the sidewall fusion line



Rys. 9. Wskazanie pozorne jako konsekwencja odbicia całkowitego fali L
Fig. 9. False (geometrical) indication as a consequence of total mode conversion

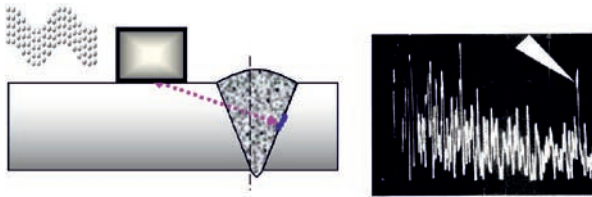
W rzeczywistych spoinach austenicznych struktura krystalitów słupkowych nie jest całkowicie jednorodna a ich wyróżniony

kierunek (Rys. 10) odchyła się od ustawienia pionowego w pobliżu granicy wtopienia spoiny. Fala ultradźwiękowa propagująca się w takim niejednorodnym materiale może zmieniać w sposób ciągły swój kierunek oraz prędkość. Wiązka ultradźwiękowa nie przebiega po liniach prostych lecz może ulegać zniekształceniom (zagięciom) na linii wtopienia, a także na kolejnych granicach ziaren. Dlatego należy liczyć się z możliwością znaczących błędów w lokalizacji wskazań od wad występujących w dalszych rejonach (poza oś spoiny) względem punktu wprowadzenia wiązki. Stąd wynika zalecenie badania spoin austenitycznych w zakresie drogi fali do pierwszej połowy skoku głowicy kątowej, $sp/2$.



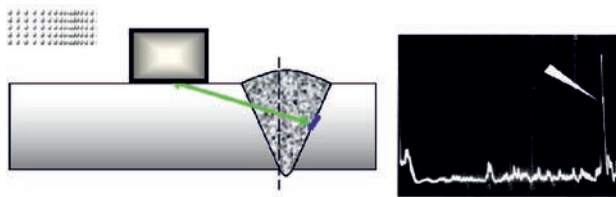
Rys. 10. Wiązka ultradźwiękowa może ulegać zniekształceniom (zagięciom) na kolumnowej niejednorodnej strukturze dendrytów, w szczególności w obszarach ich zakrzywienia (działanie podobne do fal prowadzonych – guided waves)

Fig. 10. Wiązka ultradźwiękowa może ulegać zniekształceniom (zagięciom) na kolumnowej niejednorodnej strukturze dendrytów, w szczególności w obszarach ich zakrzywienia (działanie podobne do fal prowadzonych – guided waves)



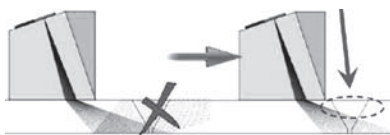
Rys. 11. Lokalizacja i obraz wskazania wady w spoinie austenitycznej falą poprzeczną spolaryzowaną pionowo – T_v

Fig. 11. Localization and image indication of imperfection in austenitic weld using transversal vertically polarized wave – T_v



Rys. 12. Lokalizacja i obraz wskazania wady w spoinie austenitycznej falą podłużną – L

Fig. 12. Lokalizacja i obraz wskazania wady w spoinie austenitycznej falą podłużną – L

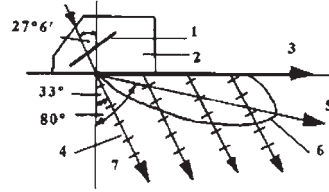


Rys. 13. W przypadku braku możliwości usunięcia lica wskazania wad w strefie przypowierzchniowej spoiny austenitycznej należy badać falą podłużną – L pelzającą, tzn. falą podpowierzchniową.

Fig. 13. In a case of no possibility of weld cap removal an indication of imperfections in subsurface area of austenitic weld shall be tested using creeping longitudinal wave – L

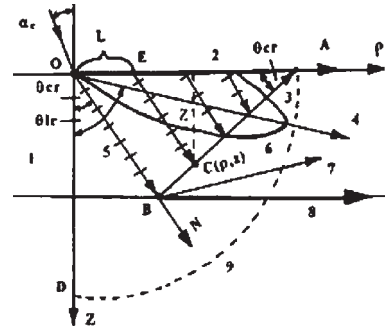
2.1 Wybór rodzaju fali w strukturach austenitycznych

W krytycznym teście lokalizacja wady w spoinie austenitycznej głowicami fal poprzecznych TV oraz fal podłużnych L o tej samej częstotliwości wykazała polepszenie stosunku sygnału do szumu $SNR > 4 \div 5$ dB (Rys. 11, 12)



Rys. 14. Zasada tworzenia fal w głowicy fal podpowierzchniowych: 1. przetwornik 2. głowica 3. fala pelzająca I rodzaju – fala podłużna (primary creeping wave) 4. fala poprzeczna główna 5. fali podłużna główna 6. obwiednia listka głównego fali podłużnej 7. Fale poprzeczne wtórne

Fig. 14. The principle of subsurface wave of longitudinal wave probe: 1. transducer 2. probe 3. primary creeping wave 4. head wave - transversal 5. head wave - longitudinal 6. the envelope of main wave vector 7. shear waves – wave mode spreading



Rys. 15. Konfiguracja wiązek w głowicy fal podpowierzchniowych: 1. obiekt badany, 2. fala pelzająca I rodzaju, 3. front fali poprzecznej, 4. fala podłużna główna I rodzaju, 5. fala poprzeczna główna, 6. obwiednia listka głównego fali podłużnej, 7. fala podłużna główna II rodzaju, 8. fala pelzająca II rodzaju, 9. front fali podłużnej

Fig. 15. Beam configurations of creeping wave probe: 1. object 2. primary creeping wave 3. wave front of transversal wave 4. head longitudinal wave 5. head transversal wave 6. the envelope of main wave vector 7. secondary head longitudinal wave 8. Secondary creeping wave 9. Longitudinal wave front

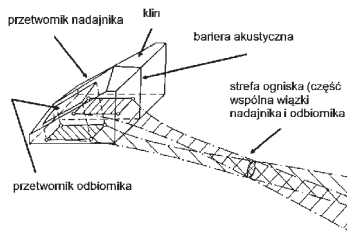
3. Dobór głowic ultradźwiękowych dla badania złączy austenitycznych

Na podstawie informacji charakteryzujących specyfikę zachowania fal UT w gruboziarnistych strukturach spoin austenitycznych można sformułować wytyczne doboru głowic do problemu badawczego anizotropowych złączy austenitycznych:

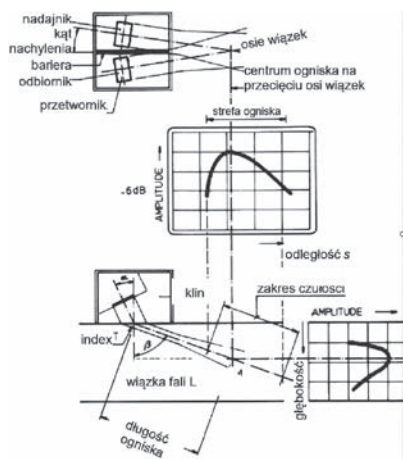
- głowice fal poprzecznych T_v mogą być stosowane raczej w ograniczonym zakresie - dla badania materiału rodzimego, cienkich spoin, itp.;
- dla polepszenia SNR preferowane są głowice fal podłużnych L (o częstotliwości podstawowej $2 \div 4$ MHz – szerokopasmowe - w zakresie szerokości pasma $40 \div 80\%$);
- ze względu na geometrię problemu należy przewodzić stosowanie głowic zarówno normalnych jak i kątowych na fale podłużne;
- analizę wskazań należy starać ograniczać w zakresie do połowy skoku głowic kątowych, ze względu na straty

po odbiciu oraz zakrzywanie trajektorii fal w stopniu złącza;

- w sytuacjach braku możliwości usunięcia lica należy przewidzieć pokrycie przeszukania strefy lica głowicami fal podpowierzchniowych (pełzających – tzw. creeping wave Rys. 13);
- należy mieć na uwadze, że towarzysząca zawsze fala T_v może zakłócać interpretację;
- nie jest zalecane głowic 1-przetwornikowych PE (duże pole bliskie ze strefą martwą) i ich ogniskowanie, ze względu na małą aperturę lokalizacji wskazań;
- preferowane jest stosowanie dwuprzetwornikowych głowic fal podłużnych TRL – większa apertura naturalnego ogniska; lepszy SNR.



Rys. 16. Przebieg wiązki ultradźwiękowej podwójnej głowicy kątowej TRL
Fig. 16. A course of ultrasonic beam of angle twin probe TRL



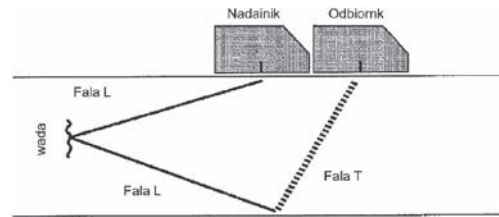
Rys. 17. Podstawowe parametry i charakterystyki podwójnej głowicy kątowej TRL
Fig. 17. Basic parameters and characteristic of angle twin probe - TRL

3.1 Dobór głowic fal podpowierzchniowych – creeping wave CWL

Jest to głowica fal podłużnych L - pełzających (tzw. creeping wave - o kącie wprowadzenia fal podłużnych bliskich 90° , $\alpha \sim 80 \div 85^\circ$) i służy do badania podpowierzchniowych i powierzchniowych stref złącza spawanego.

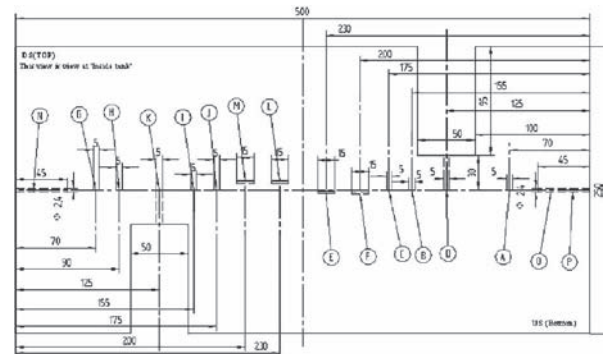
3.2 Dobór głowic kątowych fal podłużnych – TRL

Efekt rozdzielania torów głowicy kątowej fal podłużnych pokazano schematycznie na Rys. 16. Profile wiązki przetwornika nadawczego i odbiorczego nakładają się jedynie w ograniczonym obszarze materiału, który jest strefą czułości takiej głowicy (ogniskiem). Jego położenie i długość są sterowane przez kąt nachylenia przetworników.



Rys. 18. Zasada wykorzystania pośredniej techniki tandem - opartej na zjawisku transformacji fali, tzw. zamknięta pętla typu LLT – możliwe stosowanie dla różnych obszarów złącza – przez dobór kątów wprowadzenia fali L

Fig. 18. The rule of indirect tandem technique – based on mode wave conversion, i.e. closed loop LLT type – implemented for each weld area by using a different refracted angles



Rys. 19. Przykład bloku kalibracyjnego jako próbki odniesienia dla nastawiania zakresu i czułości głowic ultradźwiękowych – na wcześniej przygotowanym złączu austenitycznym wykonuje się zaprojektowane do zadania badawczego – reflektory referencyjne

Fig. 19. The scheme of calibration block as a reference specimen for range and sensitivity setting of ultrasonic probes – with special reference reflectors manufactured on base an austenitic weld previewed by LNG storage tank inspection plan

Ograniczenie efektywnej strefy czułości głowicy oznacza mniejszą ilość szumów strukturalnych, które przychodzą z wybranej objętości materiału, co zdecydowanie polepsza wartość współczynnika SNR w stosunku do głowic jednoprzetwornikowych. Jednocześnie głowica TRL wykazuje lepszą rozdzielczość kierunkową i zasięgową przy wykrywaniu i lokalizowaniu nieciągłości w obszarze ogniska (Rys. 16, 17).

3.3 Dobór głowic kątowych fal podłużnych – technika tandem – pętla LLT

Dla celów lokalizacji wad usytuowanych prostopadle do powierzchni stosuje się specjalną technikę tandem, wykorzystującą transformowaną falę poprzeczną, jak to pokazano schematycznie na Rys. 18.

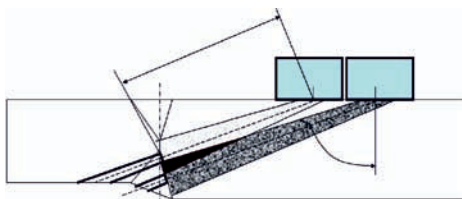
4. Plan badania – “scan plan” przykładowego w zbiornikach LNG

Blok kalibracyjny/e z typowymi złączami austenitycznymi zawierającymi reflektory referencyjne (A do P), przygotowane dla każdej strefy złącza w postaci:

- reflektorów tarczowych DSR - pod różnymi kątami;
- nacięć pod różnymi kątami

i dostosowane do wymagań studium przypadku - „badanie złącza austenitycznych o kształcie niesymetrycznego X z kontrolowanym brakiem przetopu”, pokazano na Rys. 19.

Sposób projektowania reflektorów referencyjnych dla poszczególnych stref złącza pokazano schematycznie na Rys. 20.



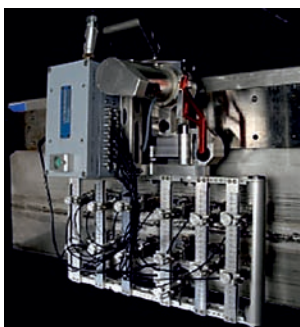
Rys. 20. Parametry każdej głowicy są optymalizowane (dla strefy w której ma być wykryty reflektor referencyjny i nastawiona wymagana czułość badania)

Fig. 20. The range and sensitivity setting of each probe are optimized on the reference reflectors previewed in any zone of inspected volume of austenitic weld

5. Wykonanie badania

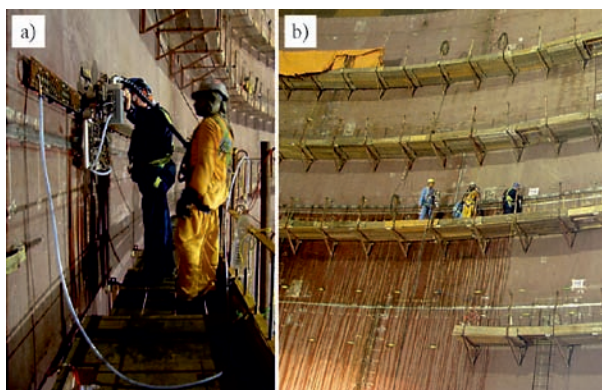
5.1 Konwencjonalny system w zbiornikach LNG – „Applus RTD”

Na Rys.21 przedstawiono widok konwencjonalnego systemu ultradźwiękowego – „Applus RTD” w trakcie kalibracji skanera wielogłowicowego na próbce odniesienia przygotowanej na bazie austenitycznego złącza spawanego, wykonanego zgodnie z projektem i technologią WPS badanego obiektu.



Rys. 21. Widok skanera wielogłowicowego w trakcie kalibracji na bloku referencyjnym

Fig. 21. Widok skanera wielogłowicowego w trakcie kalibracji na bloku referencyjnym



Rys. 22. Badanie złącza austenitycznego (9% Ni+Inconel 625) na zbiorniku LNG w trakcie montażu i ekipy badającej złącze obwodowe
Fig. 22. Implementation of multiprobe system for inspection of austenitic joints (9% Ni+Inconel 625) on the LNG storage tank during construction and inspection of girth welds from inside

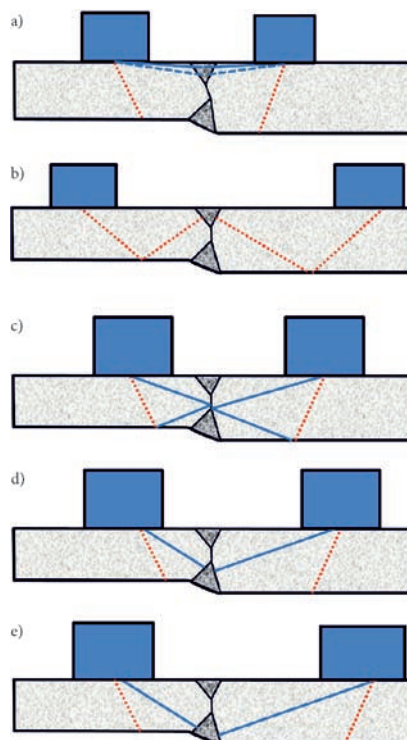
Z kolei na Rys.22a zaprezentowano sposób organizacji badania austenitycznego złącza spawanego obwodowego bezpośrednio

na obiekcie terminalu LNG. System prowadzony jest na taśmie mocowanej do ścian zbiornika przy pomocy przyssawek próżniowych.

Rys. 22b pozwala ocenić skalę procesu badania na zbiorniku wewnętrznym o średnicy 60 m i wysokości 40 m.

5.2 Przeszukiwanie złącza zbiornika LNG głowicami klasycznymi – elementy planu badania

Na rysunku 23 pokazano sposób przeszukiwania złącza dla zbiornika LNG, który składa się z następujących etapów:



Rys. 23. Przeszukiwanie złącza głowicami UT

Fig. 23. Scanning of zone with UT probes

- badanie stref powierzchniowych i podpowierzchniowych głowicami creeping wave CW-L (niebieska ciągła i przerywana linia – w zakresie do osi spoiny);
- przeszukiwanie linii wtopienia na wewnętrznej części złącza z wykorzystaniem fali poprzecznej (czerwone linie przerywane);
- przeszukiwanie strefy kontrolowanego baku przetopu – przy pomocy techniki tandem LLT (niebieskie & czerwone linie);
- badanie strefy przetopu złącza zewnętrznego głowicami nadawczo- odbiorczymi TRL (niebieska linia – w zakresie do osi);
- przeszukiwanie linii wtopienia i wewnętrznej części złącza z wykorzystaniem fali podłużnej (niebieskie linie – do osi złącza).

5.3 Zmodernizowany system Phased Array „Tank Scan LNG - Applus RTD”

Przyczyny modernizacji:

- duży ciężar skanera - konieczność używania windy;
- system prowadzenia mocowany na przyssawkach próżniowych;

- rynek badań wymaga badania głowicami PA - Phased Array
- rynkowo dostępne rozwiązania PA nie spełniają wymagań dla badania złączy austenitycznych.

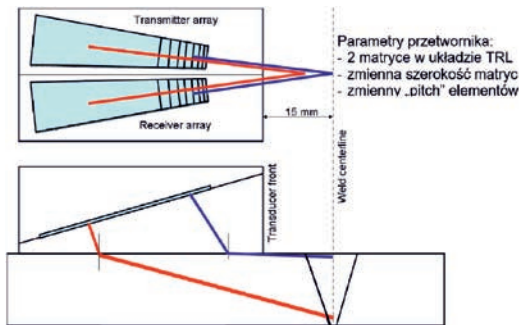


Rys. 24. Widok skanera Phased-Array w trakcie kalibracji na bloku referencyjnym

Fig. 24. View of the phased-array scanner during calibration on the welded austenitic calibration block

Korzyści modernizacji

- operacyjna mobilność skanera PA - „Tank Scan LNG - Applus RTD”, wykorzystanie rynkowych rozwiązań aparatów PA 128 z nowoczesnym oprogramowaniem (Rys. 24);
- sterowanie z laptopa, mniejsze zużycie energii i wody na sprzężenie;
- możliwość konfiguracji do 100 rodzajów głowic konwencjonalnych na tylko dwóch głowicach PA DMA-TRL (Dual Matrix Transmitter-Receiver Longitudinal wave) ;
- możliwość wcześniejszego oprogramowania grup przeszukiwania wynikających z planu skanowania złącza;
- jednoczesne uruchamianie i praca wielu konfiguracji w tym samym czasie;
- zapis i śledzenie wyników w czasie rzeczywistym.



Rys. 25. Schemat budowy głowicy podwójnej kątowej phase-array – PA DMA-TRL

Fig. 25. Construction scheme of angle twin phase-array probe – PA DMA-TRL

5.4 Wymagania dla głowic PA DMA-TRL – dla spoin austenitycznych

Możliwości generacji:

- fal pełzających L;
- fal podłużnych L
- techniki tandem LLT
- grupy konwencjonalnych głowic TRL

Wymiary PA DMA-TRL

- duże matryce (64 mm, 2 MHz, kąt klina 10°, pitch 1÷3 mm);
- małe matryce (32 mm, 2 ÷5 MHz, kąt klina 10°÷20°, pitch 1 mm).

Rys. 25 i 26 przedstawiają zasady budowy i pracy nowoczesnego rozwiązania głowic phase-array, dedykowanego dla badania złączy austenitycznych.

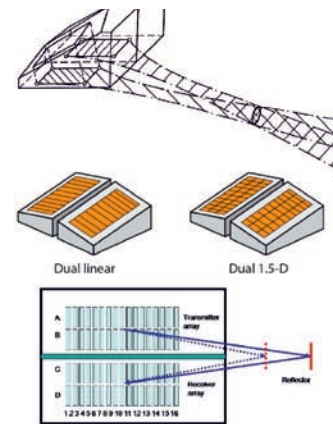


Rys. 26. Widok zintegrowanej głowicy – PA DMA-TRL

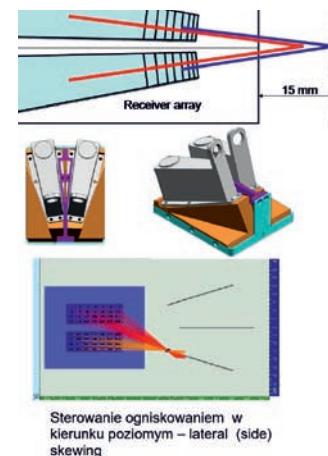
Fig. 26. View of integrated angle twin phase-array probe – PA DMA-TRL

5.5 Aktualna technologia głowic PA DMA-TRL w badaniu złączy austenitycznych

W obecnych technologiach Phased Array - PA dla złączy austenitycznych, głowice TRL są symulowane przez podwójną matrycę DMA. Kąt wprowadzenia (odbioru) wiązki może się zmieniać, index głowicy pozostaje na ogół stały;



Rys. 27. Zasady budowy i sterowania wiązką głowicy PA DMA-TRL
Fig. 27. The rule of construction scheme of angle twin probe and beam steering of phase-array probe – PA DMA-TRL



Rys. 28. Zasady budowy i sterowania wiązką głowicy PA DMA-TRL (patent Applus RTD) – w wykonaniu do badania złączy austenitycznych zbiorników LNG

Fig. 28. The rule of construction scheme of angle twin probe matrix (patent of Applus RTD) and beam steering of phase-array probe – PA DMA-TRL – the probe dedicated to austenitic weld inspection of LNG storage tank

Pojedyncze kryształy głowic klasycznych są zastąpione przez matrycę PA, typowo 16 x 4 elementy.

Matryce PA pozwalają na sterowanie wiązką w dwóch kierunkach: kątowym oraz "ogniska" (część wspólna wiązek) lub mogą być też wersje z ograniczeniami.

5.6 Konsekwencje zastosowania głowic PA DMA-TRL

Wprowadzenie do praktyki badań ultradźwiękowych głowic PA DMA-TRL niesie za sobą następujące skutki:

- głowice PA DMA-TRL pozwalają na pełne pokrycie objętości badania, wykorzystując możliwość sterowania w zakresie kątowym aż do $\sim 85^\circ$ (fale pełzające) oraz sterowanie w zakresie apertury matryc DMA;
- kalibracja poszczególnych pozycji skanowania głowic PA DMA-TRL - wynikających z planu skanowania - na bloku kalibracyjnym;
- dla zastosowanych wymiarów matryc index głowic może ulegać zmianom, zatem płaskie wady mogą być wykrywane pod kątem prostym;
- pewne wykrywanie wad pionowych (np. - zimnych pęknięć, przyklejeń z wykorzystaniem techniki tandem LLT);
- amplituda sygnału może być używana do wymiarowania wskazań;
- dyfrakcja sygnałów (TOFD) nie może być używana do wymiarowania (zbyt słabe echa w spoinie austenitycznej).

5.7 Badanie złączy austenitycznych zbiornika LNG – głowice PA DMA-TRL

Na rysunku 29 pokazano przykładowy sposób przeszukiwania złącza dla zbiornika LNG, który składa się z następujących etapów:

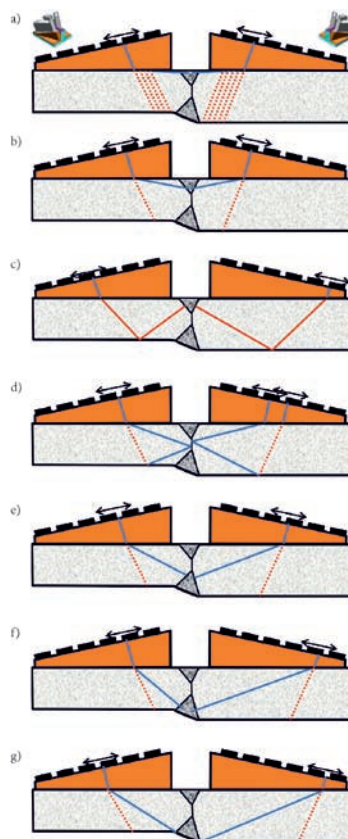
- a) badanie stref powierzchniowych falami creeping wave CW-L (niebieska ciągła linia – w zakresie do osi spoiny);
- b) badanie stref podpowierzchniowych falami L (niebieska ciągła linia – w zakresie do osi spoiny);
- c) przeszukiwanie linii wtopienia na wewnętrznej części złącza z wykorzystaniem fali poprzecznej (czerwone linie ciągłe);
- d) przeszukiwanie strefy kontrolowanego braku przetopu – przy pomocy techniki tandem LLT (niebieskie & czerwone linie);
- e) badanie strefy przetopu i linii wtopienia złącza zewnętrznego falami L (niebieska linia – w zakresie do osi);
- f) badanie i linii wtopienia i strefy złącza zewnętrznego falami L (niebieska linia – w zakresie do osi)
- g) badanie strefy podpowierzchniowej i linii wtopienia złącza zewnętrznego falami L (niebieska linia – w zakresie do osi).

6. Podsumowanie - zalety głowic PA DMA-TRL i zmechanizowanego systemu UT

Opisane powyżej aspekty badań głowicami PA SMA-TRL w połączeniu ze zmechanizowanym systemem UT ujawniają się następujące cechy:

- matryce mają wystarczającą długość do akomodacji indeksu głowicy, wystarczającego do przeszukania całej grubości ścianki złącza – na konstrukcji zbiornika LNG;
- szerokość kryształów matryc modyfikowana do sposobu pracy konwencjonalnych głowic (przód węższy, tył szerszy);

- wielkość pitch'u zmienia się od przodu do tyłu:
 - sterowanie z wykorzystaniem co najmniej 8 elementów (wymagane do poprawnego sterowania),
 - zmiana wielkości pitch'u - umożliwia likwidację listków bocznych (czyszczenie wiązki);
- apertura kątowa (zбочzenie kątowe) wiązki wystarczająca dla górnej i dolnej strefy złącza, nie jest potrzebne sterowanie poziome (lateral steering);



Rys. 29. Przeszukiwanie złącza głowicami PA DMA-TRL
Fig. 29. Przeszukiwanie złącza głowicami PA DMA-TRL

- głowice PA DMA-TRL generują fale pełzające oraz przejmują funkcję pozostałych głowic konwencjonalnych;
- wiele głowic konwencjonalnych zastępują 2 głowice PA DMA-TRL (lżejszy skaner, mniejsze zużycie wody);
- wymiarowanie możliwe na bazie skanu podstawowego
- mechanizacja przesuwu skanera pozwala na płynny cyfrowy zapis wyników oraz dostosowanie wydajności badania do wymagań projektu.

7. Dokumenty cytowane

- [1] LNG Presentation, Polskie LNG Project, April 6, 2011, Rotterdam, Netherlands
- [2] PN-EN ISO 17640:2011, Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych
- [3] J. Deputat, Ultradźwiękowe badanie spoin austenitycznych, Dozór Techniczny Nr 1/1991, s. 5 ÷ 11
- [4] PN-EN ISO 22825:2012, Badanie Ultradźwiękowe. Badanie spoin w stalach austenitycznych i stopach na bazie niklu
- [5] UDT-CERT, Materiały szkoleniowe, kurs specj. UT3s, rozdz. 9.1
- [6] S. Mackiewicz, Ultradźwiękowe badanie spoin austenitycznych, XII Seminarium Nieniszczące Badanie Materiałów, Zakopane, marzec 2006