

Tadeusz Morawski*

UTiE "Level", Warszawa, Polska

Zapewnienie jakości spoin w konstrukcjach stalowych

Quality assurance of welds in steel structures

ABSTRACT

The aim of the publication was to identify the main factors affecting the quality assurance of welds in steel structures. Particular attention was paid to the importance of imperfections and notches in carrying structures static and fatigue. Also recalled the basis for the fatigue strength of welds and provides examples of the types of joints in classes FAT. Conducted analysis of the requirements for imperfections for quality levels, B, C, D according to PN-EN ISO 5817: 2014 [4]. It highlighted the lack of attention to the CEN in connection with failures in the content standards. The new NDT techniques exemplified research tanks using PA.

Keywords: quality assurances, fatigue resistance, quality levels, fatigue classes of welded structure elements, standards, ultrasonic phased array (PA)

STRESZCZENIE

Celem publikacji było określenie głównych czynników mających wpływ na zapewnienie jakości spoin w konstrukcjach stalowych. Szczególną uwagę zwrócono na znaczenie niezgodności spawalniczych i korbów w konstrukcjach przenoszących obciążenia statyczne i zmęczeniowe. Przypomniano także podstawy dotyczące wytrzymałości zmęczeniowej spoin oraz podano przykłady typów złączy w klasach FAT. Przeprowadzono analizę wymagań dla niezgodności spawalniczych o poziomach jakości B, C, D, według PN-EN ISO 5817:2014E [4]. Podkreślono brak dbałości CEN w związku z usterkami w treści norm. Nowe techniki NDT zilustrowano przykładem badania zbiorników metodą PA.

Słowa kluczowe: zapewnienie jakości, wytrzymałość zmęczeniowa, poziomy jakości, klasy zmęczeniowe spawanych elementów konstrukcji, normy, wieloprzetwornikowe badanie ultradźwiękowe (PA)



Dr. Inż.

Tadeusz Morawski

1. Wstęp

Zapewnienie jakości konstrukcji spawanych jest procesem złożonym. Wymaga szeregu działań, których liczba wzrasta wraz ze stopniem ważności konstrukcji. Znaczącą rolę w tym procesie odgrywają złącza spawane, które mogą mieć decydujący wpływ na zakres użytkowania i niezawodność konstrukcji. Realizacja najważniejszych działań obejmuje:

- ustalenie warunków eksploatacji konstrukcji (temperatura, rodzaj i wielkość obciążeń, warunki korozyjne, okres eksploatacji itp.) oraz założeń dla rozwiązań konstrukcyjnych (rodzaj połączeń, rodzaj prętów: kształtowniki, rury, pełne pręty itd.);
- kształtowanie elementów konstrukcji, np. wg PN-EN 1993-1-8 [1] decyduje o stanie naprężeń, stopniu ich koncentracji oraz wielkości naprężeń własnych. Te z kolei wpływają na decyzję projektanta o gatunku stali. Błędy popełnione w fazie projektowania są trudne do naprawienia w wytwórni konstrukcji [2, 3]. Źle ukształtowanych elementów i połączeń nie można poprawić nawet przy zastosowaniu najlepszych technologii wytwarzania, składania i kontroli;
- określenie poziomu jakości QL (Quality Level) spoin lub granicznych wymiarów poszczególnych

niezgodności spawalniczych. Zagadnienie to wydaje się proste. Mamy przecież bogaty zestaw norm europejskich z zakresu badań nieniszczących [4-12], a zwłaszcza podstawową PN-EN ISO 5817 [4]. Norma ta ma zastosowanie dla spoin czołowych i pachwinowych o grubości materiału $t \geq 0,5$ mm, które przenoszą obciążenia statyczne, przeważająco stałe oraz wynikające z działania ciśnienia, temperatury czy korozji. Dodatkowo podano zalecenia dla konstrukcji przenoszących obciążenia zmęczeniowe;

- wybór technologii spawania oraz zatrudnienie kompetentnego personelu spawalniczego (spawalnicy, spawacze). Warto w tym miejscu podkreślić rolę inspektorów nadzoru. Stała ich obecność w procesie wytwarzania, a zwłaszcza podczas scalania i montażu elementów konstrukcji zawsze pomaga w utrzymaniu dobrej jakości wykonywanych operacji. Niestety rola nadzoru inwestorskiego nie jest doceniana, zbyt często jego miejsce z placu budowy przenoszone jest do biur i sal konferencyjnych;
- powierzenie montażu konstrukcji wytwórcy lub specjalistycznej firmie, według szczegółowo opracowanej technologii, w której dużą wagę powinna odgrywać kolejność składania elementów wysyłkowych. Najefektywniejszy technicznie i ekonomicznie jest montaż prosto "z kół", dzięki któremu unika się błędów przy składowaniu elementów konstrukcji (deformacje, uszkodzenia) oraz obniża koszty;
- zadbanie o sprawną organizację komórek kontroli technicznej, w tym o docenianie laboratorium zakładowego. Komórki te powinny dysponować personelem o sprawdzonych umiejętnościach, który jest w stanie, między innymi wykonywać badania różnymi metodami

*Autor korespondencyjny. E-mail: level_tmo@onet.pl

NDT oraz przeprowadzać analizę skutków obecności w konstrukcji wykrytych nieprawidłowości.

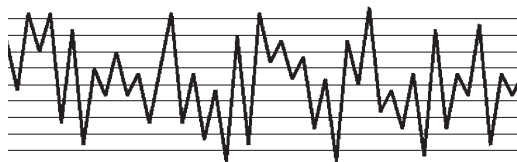
2. Zmienne obciążenia konstrukcji spawanych

Większość konstrukcji stalowych przenosi obciążenia przeważająco stałe. Co to praktycznie oznacza? Kiedy o bezpieczeństwie konstrukcji decyduje wytrzymałość zmęczeniowa? Zmęczenie materiału jest spowodowane działaniem zmiennego w czasie obciążenia, którego przebieg ma zazwyczaj charakter losowy (Rys. 1.), wynikający z warunków pracy konstrukcji. Zalecane jest takie kształtowanie złączy spawanych, aby zmienne obciążenia występowały w powtarzających się wielkościach i częstościach w stałych przedziałach czasu t . Mamy wówczas przypadek zmiennego obciążenia sinusoidalnego, opisanego wzorem (1), które przyjęto za podstawowe do wyznaczania własności materiałów i kształtowania elementów konstrukcji.

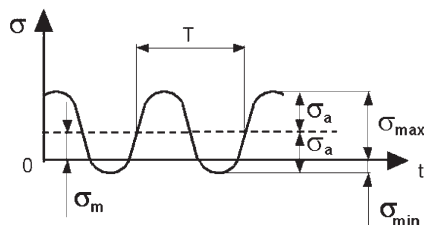
$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

gdzie: ω - częstość kołowa zmian naprężenia

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$



Rys. 1. Losowe zmiany obciążenia
Fig. 1. Random load changes



Rys. 2. Zmiany naprężeń $\Delta\sigma$ o amplitudach σ_a
Fig. 2. Stress $\Delta\sigma$ changes with amplitudes σ_a

Konstrukcję spawaną uznaje się za przenoszącą obciążenia przeważająco stałe [13, 18], gdy liczba cykli N zmiany naprężeń $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$, w czasie eksploatacji konstrukcji, nie przekracza dopuszczalnej wartości N_{dop} podanej w Tabl. 1. Jeżeli rozpatrywanej wartości $\Delta\sigma$ nie ma w tablicy to dopuszczalną ilość cykli określa się ze wzoru (3):

$$N_{dop} = \frac{80 \cdot 10^9}{\Delta\sigma} \quad (3)$$

W przypadku, gdy zakres naprężeń $\Delta\sigma$ ulega istotnym zmianom w okresie eksploatacji konstrukcji, należy przeprowadzić obliczenie sprawdzające wg wzoru (4):

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (4)$$

gdzie: n_i - liczba cykli naprężeń $\Delta\sigma$ w badanych okresach „i” eksploatacji konstrukcji, N_i - liczba dopuszczalnych cykli N_{dop} dla $\Delta\sigma$ w okresach „i”.

Przykład obliczeń podano w Tab. 2 dla pięciu okresów użytkowania konstrukcji. Wynik $\frac{n_i}{N_i} = 0,88 < 1$ oznacza,

że konstrukcja jest poddawana obciążeniom przeważająco stałym.

3. Wytrzymałość zmęczeniowa konstrukcji spawanych

Wytrzymałością zmęczeniową nazywamy takie naprężenie σ_{max} dla danego cyklu naprężeń, przy którym złącze nie ulegnie zniszczeniu po osiągnięciu umownej granicznej liczby cykli N_G , (dla stali $N_G = 10 \cdot 10^6$). Wytrzymałość zmęczeniową wyrażają wykresy S-N (Wöhlera) wiążące wielkość naprężeń $\Delta\sigma$ z liczbą cykli N , które przedstawiono w układzie współrzędnych $[\sigma, \log N]$ na Rys. 3. jako ilustrację zależności:

$$N = c / \Delta\sigma^m \quad (5)$$

gdzie: m - współczynnik stopnia nachylenia krzywych S-N, dla stali $m = 3,0$; c - stała przybierająca wartości podane w Tab. 3., w zależności od rodzaju (stopnia nasilenia) karbu w złączu.

Punkt przecięcia się obydwóch odcinków wykresu wyznacza teoretyczną, graniczną liczbę cykli, która w różnym stopniu może odbiegać od przyjętej bazowej liczby cykli N_G .

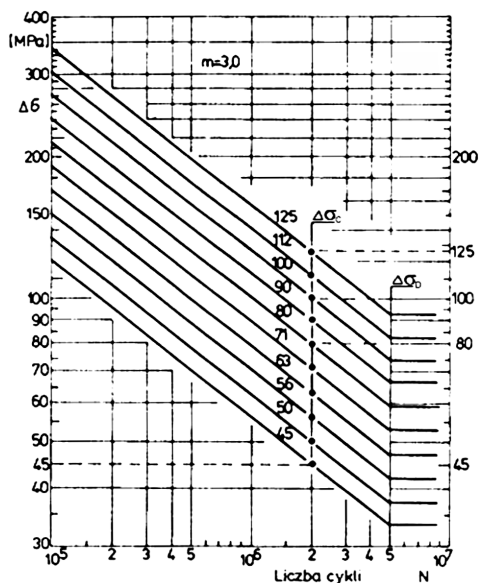
Tab. 1. Dopuszczalna liczba cykli N_{dop} naprężeń $\Delta\sigma$ przy obciążeniach przeważająco stałych

Tab. 1. Acceptable number of cycles of N_{dop} stresses $\Delta\sigma$ at predominantly constant loads

L.p.	$\Delta\sigma$ [MPa]	N_{dop} [cykle]
1	200	$10 \cdot 10^3$
2	180	$14 \cdot 10^3$
3	160	$20 \cdot 10^3$
4	140	$30 \cdot 10^3$
5	120	$46 \cdot 10^3$
6	100	$80 \cdot 10^3$
7	80	$160 \cdot 10^3$
8	60	$370 \cdot 10^3$
9	50	$640 \cdot 10^3$
10	40	$1,25 \cdot 10^6$
11	34	$2,5 \cdot 10^6$
12	30	$3,0 \cdot 10^6$
13	20	$10 \cdot 10^6$

Tab. 2. Potwierdzenie przeważająco stałych obciążeń konstrukcji
Tab. 2. Confirmation of predominantly constant structural loads

Okres eksploatacji „i”	n_i	$\Delta\sigma$ [MPa]	N_{dop} [cykle]	n_i/N_{dop}
1	$0,9 \cdot 10^3$	140	$30 \cdot 10^3$	0,03
2	$8 \cdot 10^3$	100	$80 \cdot 10^3$	0,10
3	$74 \cdot 10^3$	60	$370 \cdot 10^3$	0,20
4	$375 \cdot 10^3$	40	$1,25 \cdot 10^6$	0,30
5	$750 \cdot 10^3$	30	$3,0 \cdot 10^6$	0,25
Suma n_i/N_i				0,88 < 1



Rys. 3. Wykres zmęzeniowy dla stali przy zmiennych naprężeniach normalnych

Fig. 3. Fatigue resistance curves for steel, normal stress

4. Wpływ korbów na jakość spoin

Przyczyną koncentracji naprężeń w obciążonych złączach spawanych są karby. Przeprowadzając badania nieniszczące spoin w procesie wytwarzania, montażu i eksploatacji konstrukcji, mamy do czynienia głównie z korbami geometrycznymi, którymi są niezgodności spawalnicze. Elementy złącza spawanego mogą mieć różne kształty, rodzaj spoin oraz jakość powierzchni. Tak odmiennie ukształtowane złącza są korbami, o większym lub mniejszym wpływie na koncentrację naprężeń. Aktualna klasyfikacja tych korbów opracowana w IIW wymienia następujące ponumerowane typy [1, 14-16,]:

- 100 - Elementy niespawane, Unwelded parts of a component;
- 200 - Złącza doczołowe, obciążenia poprzeczne, But welds, transverse loaded;
- 300 - Ciągłe spoiny podłużne, Longitudinal load-carrying welds;
- 400 - Złącza krzyżowe i typu T, Cruciform joints and/or T-joints;
- 500 - Nieobciążone przyłącza itp., Non-load-carrying attachments;
- 600 - Złącza zakładkowe, Lap joint;
- 700 - Wzmocnienia, Reinforcements;
- 800 - Połączenia kołnierzowe, odgałęzienia i dysze, Flanges, branches and nozzles;
- 900 - Złącza rurowe, Tubular joint.

Każdy typ połączenia tworzy zbiór spawanych elementów o takich samych lub podobnych kształtach, które w praktyce wykonywane są odmienną technologią i z inną dokładnością. Są one zaliczane do różnych klas wytrzymałości zmęzeniowej FAT (Tab. 3). Przykłady określonego typu złącza spawanych, wykonanych w różnych klasach FAT, podano w Tab. 4 z zaznaczonymi kierunkami działania obciążeń oraz prawdopodobnym miejscem pojawienia się pęknięcia zmęzeniowego.

Tab. 3. Wartości stałej „c” oraz trwałej wytrzymałości zmęzeniowej $\Delta\sigma_D = \text{const}$ (dla $N = 5 \cdot 10^6$) przy naprężeniach rozciągających i ściskających dla różnego stopnia nasilenia karbu wyrażonego klasą zmęzeniową FAT, tj. wartością $\Delta\sigma_c$ przy liczbie cykli $N = 2 \cdot 10^6$

Tab. 3. Constant „c” and durable fatigue resistance values $\Delta\sigma_D = \text{const}$ (at $N = 5 \cdot 10^6$) for tensile and compressive stresses for different degrees of notch intensity expressed by FAT fatigue class, ie $\Delta\sigma_c$ at $N = 2 \cdot 10^6$

$\Delta\sigma_c$; FAT [MPa]	m = 3,0	
	c	$\Delta\sigma_D$ [MPa]
125	$3,91 \cdot 10^{12}$	92
112	$2,81 \cdot 10^{12}$	82
100	$2,00 \cdot 10^{12}$	74
90	$1,46 \cdot 10^{12}$	66
80	$1,02 \cdot 10^{12}$	59
71	$7,16 \cdot 10^{11}$	52
63	$5,00 \cdot 10^{11}$	46
56	$3,51 \cdot 10^{11}$	41
50	$2,50 \cdot 10^{11}$	37
45	$1,82 \cdot 10^{11}$	33

5. Poziomy jakości spoin w konstrukcjach stalowych

Wykonanie idealnych spoin „bez wad” jest praktycznie nierealne. Dążenie do spełnienia zbyt ostrych poziomów akceptacji niezgodności spawalniczych najczęściej powoduje wycinanie mniej znaczących niezgodności i wprowadzanie innych, często groźniejszych w skutkach, np. mikropęknięć czy przyklejeń. Od ponad pięćdziesięciu lat poszerzana jest wiedza o wpływie niezgodności spawalniczych na wytrzymałość złączy przenoszących różny rodzaj naprężeń. Najbogatsza literatura na ten temat, oparta na badaniach laboratoryjnych i doświadczeniach przemysłowych, publikowana jest w dokumentach Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa IIW (International Institute of Welding) i upowszechniana w normach ISO. Rok temu właśnie w Instytucie padły słowa: „Nothing is perfect. This includes welds and People.” To dr Geoff Booth komentował swój wykład pt.: Lessons from Catastrophic Weld Failures. Dobrą ilustracją zmian przy ocenie jakości spoin są kolejne weryfikacje normy EN-ISO 5817 (EN 25817:1992, EN ISO 5817:2003, 2007, 2014 i planowana na 2017 r.). Wszystkie wersje tej normy stanowiły o poziomach jakości B, C, D według niezgodności spawalniczych. Norma z 2014 r. [4] wprowadza w punkcie 3.9 po raz pierwszy definicję klasy zmęzeniowej FATx (fatigue class). W miejsce symbolu „x” zapisuje się wartość zakresu dwustronnie zmiennych naprężeń $\Delta\sigma^c$ przy $N = 2 \cdot 10^6$ cykli. Źródłowy dokument [14], dla normy [4], podaje podstawowe informacje i zalecenia dotyczące projektowania połączeń spawanych przenoszących zmienne obciążenia oraz procedury oceny przeprowadzanych analiz dla uniknięcia awarii spowodowanych zmęczeniem. Pełny tekst dokumentu jest dostępny w Internecie.

Tab. 4. Wybrane typy elementów spawanych w klasach zmęczeniowej FAT

Tab. 4. Selected types of welded elements in FAT fatigue classes

Typ nr	Element konstrukcyjny	Charakterystyka złącza t - grubość materiału	FAT [MPa]
211		Spoiny czołowe X lub V, obciążenia poprzeczne, szlifowana, 100% NDT	112
212		Spoina wykonana w hali, NDT, nadlew < 0,1t, przesunięcie < 5% t	90
214		Spoin na usuwanej nietopliwej podkładce. VT, przesunięcie < 10% t	80
215		Spoina na stałej podkładce Przesunięcie liniowe < 10% t	71
216		Spoina jednostronna. NDT Pełny przetop. Przesunięcie < 10% t, Gdy nie ma NDT:	71 36
221		Spoina szlifowana, NDT, zbieżność lub nachylenie: 1:5 1:3 1:2	112 100 90
222		Spawanie w hali. NDT. Zbieżn.: 1:5 1:3 1:2	90 80 72
231		Spoina czołowa elementów (prętów) walcowanych, szlifowana. NDT	80
232		Spoina obwodowa spawana z jednej strony, pełny przetop, NDT grani. Gdy nie ma NDT:	71 36
311		Spoiny wykonane automatycznie bez zatrzymywania. Spawanie z „przystankami”	125 90
313		Wzdłużna spoina czołowa, z obu stron szlifowana równoległe do kierunku obciążenia, NDT	125
322		Ciągła automatyczna dwustronna spoina pachwinowa bez śladów zatrzymywania spawania	100
411		Złącze krzyżowe lub T, spoiny K pełny przetop, szlifowane brzegi. przesunięcie e < 15% t	80
415		Złącze krzyżowe lub T, spoina „na V”, pełny przetop, NDT, e < 15% t. Gdy grań nie jest badana:	71 36
525		Wstawka przyspawana o długości l: l < 150 mm l < 300 mm l > 300 mm	50 45 40

W Aneksie C normy [4] zamieszczono dopuszczalne wymiary nieciągłości dla poziomów jakości spoin obciążonych zmęczeniowo. Poziom jakości D nie ma tu zastosowania, a dla poziomów C i B wprowadzono uzupełniające wymagania. W ten sposób utworzone zostały trzy poziomy jakości: C63, B90 i B125 równoważne klasom zmęczeniowym FAT63 ($36 \leq \Delta\sigma_c < 63$), FAT90 ($63 \leq \Delta\sigma_c < 90$) i FAT125 ($90 \leq \Delta\sigma_c < 125$). Poziom jakości C63 w zasadzie określany jest takimi samymi wymaganiami jak dla spoin o poziomie jakości C (Tab. 1. w PN [4]). Poziom jakości B90 praktycznie jest tożsamy

z wymaganiami dla poziomu B, chociaż ograniczona została długość pęcherzy (2015, 2016) do max 20 mm dla złączy odprężanych, a gniazdo pęcherzy (2013) potraktowano, chyba pomyłkowo, niezgodnie z „filozofią oceny pęcherzy” zawartą w głównej tablicy normy. Filozofia ta polega na rezygnacji z obliczania, w procentach, maksymalnej powierzchni rzutowania pęcherzy (2013, 2014). Ich dopuszczalną wielkość określono wymiarami liniowymi: d - średnica pęcherza, h - szerokość wskazania, szerokość lub wysokość powierzchni pęcherzy, l - długość wskazania (Rys. 5).

Dla osiągnięcia poziomu jakości B125 powierzchnia złącza spawanego nie może być w stanie surowym (as welded). W tym poziomie nie dopuszcza się obecności większości niezgodności spawalniczych, a pozostałym powierzchniowym ograniczono dopuszczalny wymiar, np. nadlew spoiny (502) do max 2 mm, wyciek (504) do max 1 mm. Poziom B125 został wykluczony dla spoin pachwinowych. Pęcherze 2013 i 2014 mają tu podobnie jak dla poziomu B90 błędnie określone wymagania. Błąd ten potwierdzają dane zawarte w najnowszej (publikacja styczeń 2017) normie EN ISO 10675-1: 2016E [8], według której podano w tabeli 5 przykład oceny pęcherzy metodą radiograficzną.

Tab. 5. Ocena pęcherzy wg EN ISO 10675-1: 2016E [8]

Tab. 5. Evaluation of pores according to EN ISO 10675-1: 2016E [8]

przypadek 1 ($D > d_{A2}$)		przypadek 2 ($D < d_{A2}$)	
2014 Łańcuch pęcherzy		2013 Gniazdo pęcherzy	
QL D	$h \leq 0,4 s$, max 4 mm $l \leq s$, max 75 mm	$d_A \leq wp$, max 25 mm $L = l_p = 100$ mm	
QL C	$h \leq 0,3 s$, max 3 mm $l \leq s$, max 50 mm	$d_A \leq wp$, max 20 mm $L = l_p = 100$ mm	
QL B	$h \leq 0,2 s$, max 2 mm $l \leq s$, max 25 mm	$d_A \leq wp$, max 15 mm $L = l_p = 100$ mm	

Dla zapewnienia jakości konstrukcji ważny jest racjonalny dobór metod kontroli spoin oraz ustalanie poziomów akceptacji wskazań AL (Acceptance Level) od wykrytych niezgodności. Zasady doboru AL wskazań, wykrytych głównymi metodami NDT, podają normy [6, 8 - 11]. Tylko przy badaniu spoin metodą wizualną ocenia się rzeczywiste wymiary niezgodności powierzchniowych przez ich porównanie z wymiarami granicznymi podanymi w normie [4].

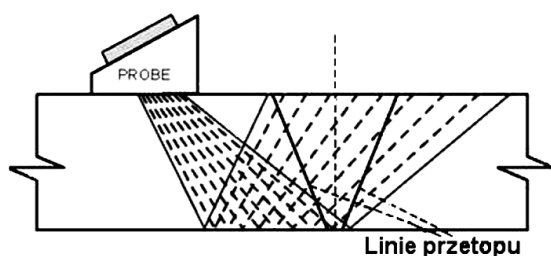
Badania metodami magnetycznymi i penetracyjnymi praktycznie ograniczają się do poszukiwania pęknięć i w tym

zakresie są skutecznym uzupełnieniem badań wizualnych. Wymiary wskazań akceptowanych PT [10] i MT [11] dla poszczególnych poziomów jakości spoin nie uległy zmianie od wielu lat.



Rys. 4. Zbiornik na ciekły etylen: $D = 12140$ mm, $L = 42$ m, ścianki $t = 22,8 \div 25$ mm. Spoiny badane w 100% RT i 100% UT-PA (phased array).

Fig. 4. The tank for liquid ethylene: $D = 12140$ mm, $L = 42$ m, wall $t = 22,8 \div 25$ mm. Welds inspected 100% RT and 100% UT-PA (phased array).



Rys. 5. Wiązka ultradźwiękowa głowicy 2L64-A2 z układem 64 elementów przetwornikowych (PA).

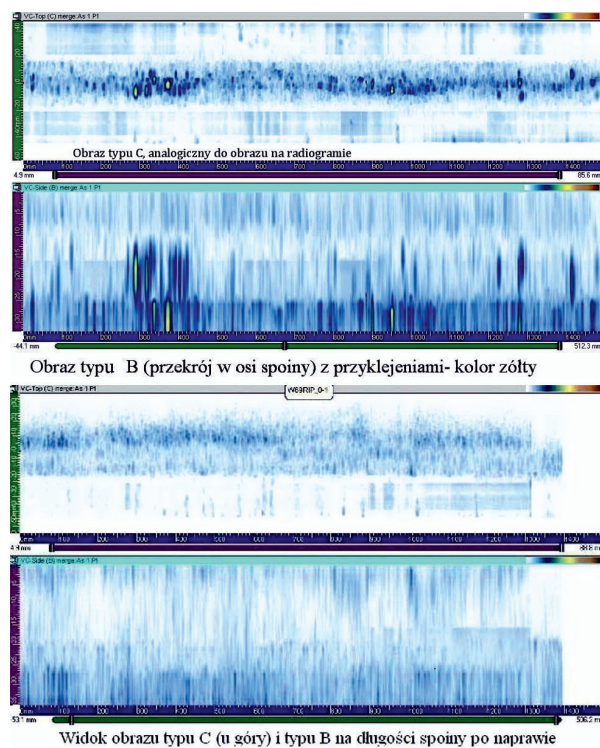
Fig. 5. Ultrasonic beam of the probe 2L64-A2 with array of 64 transducer elements (PA).

Wspomniane wcześniej „usterki” norm [4 i 8] powinny skłaniać personel NDT do dokładniejszej analizy zmian w cyklicznie weryfikowanym normach. Chodzi głównie o zmiany, które mogą wpłynąć na ocenę jakości spoin. W normie ultradźwiękowej [9] zmianie uległy, np. wartości niektórych reflektorów odniesienia dla techniki nr 2, tj. średnicy płaskodennego otworu D_{DSR} . Dla poziomów akceptacji wskazań AL2 i AL3 w spoinach o grubości $8 \leq t < 15$ mm i $15 \leq t < 40$ mm średnice te zwiększono o 0,5 mm, odpowiednio z 1,0 mm do 1,5 mm oraz z 1,5 mm do 2,0 mm. Powierzchnia płaska takiego reflektora powiększyła się znacznie, a zatem przy ustalaniu poziomu odniesienia (wzmocnienia aparatu w dB) otrzymamy impuls o takiej samej wysokości (echo od dna reflektora odniesienia) przy niższym poziomie wzmocnienia. Wszystkie pozostałe parametry badania: poziom oceny, poziom zapisu i poziom akceptacji są funkcją poziomu odniesienia. Nowe wykresy tych poziomów podane w PN [9] są czytelne, ale czy ich stosowanie zapewnia taką samą czułość wykrywania wskazań niezgodności jak w przypadku ustaleń z poprzedniej wersji normy [9]? Podobne pytanie dotyczy wcześniej omówionej zmiany zasad oceny pęcherzy, które upraszczają ocenę obrazu radiograficznego pęcherzy, ale czy ocena jakości spoin jest taka sama? Podczas rutynowych badań przemysłowych najczęściej nie ma czasu na prowadzenia

takich porównań, a brak norm PN w polskiej wersji językowej zniechęca do podobnych analiz.

Ważnym czynnikiem wiarygodności badań NDT jest umiejętność wykorzystania aparatury badawczej, w szczególności tej skomputeryzowanej. Nowoczesna aparatura spowodowała utworzenie nowych technik i oddzielnych metod NDT. W metodzie radiograficznej mamy już klasyczną radiografię błonową (TR-F) i rozbudowaną radiografię cyfrową (RT-DR). Metoda ultradźwiękowa wzbogaciła kontrolę spoin o kolejną komputerową technikę wieloprzetwornikową PA (phased array).

W systemie PA stosowane są głowice ultradźwiękowe z wieloma miniaturowymi przetwornikami, z których każdy niezależnie wysyła i odbiera falę ultradźwiękową z pewnym, elektronicznie sterowanym opóźnieniem (Rys. 5). Przeszukiwanie wiązką ultradźwiękową wykonuje się, przesuwając głowicę równoległe do osi spoiny (odpada ruch zygzakowy). Przykładem zastosowania techniki PA jest badanie zbiorników na ciekły etylen (Rys. 4.) opisane w publikacji [17, 18]. Rysunek 6 podaje skany spoiny z przyklejeniami i po ich wycięciu. Wielką zaletą jest możliwość obserwacji badanego złącza w postaci wizualizacji, z wykorzystaniem zobrazowania typu B (obraz podłużnego przekroju, ujawnia głębokość położenia wady i jej podłużny wymiar) i typu C (obraz jak na radiogramie, wielkość niezgodności określają barwy, od żółtej do brązowej).



Rys. 6. Skany spoiny z przyklejeniami i po jej naprawie.
Fig. 6. Weld scans with the lack of fusion and after after repair.

6. Podsumowanie

Przyczyny uszkodzeń lub katastrof różnych konstrukcji spawanych dowodzą, że większość z nich wzięła początek od obecnych w złączu niezgodności dwuwymiarowych, które mogą powstać w wyniku procesu spawania, a następnie powiększają się w trakcie eksploatacji konstrukcji aż do osiągnięcia wielkości krytycznej (kruche pęknięcia)

bądź w przypadku przekroczenia granicznej wytrzymałości zmęczeniowej (działanie karbu, pęknięcie).

Wprowadzenie do PN-EN ISO 5817 granicznych wymiarów niezgodności spawalniczych dla klas wytrzymałości zmęczeniowej stwarza szansę opracowania takiej normy „matki”, która stanie się jedynym źródłem dla norm stanowiących poziomy akceptacji wskazań w badaniu złączy spawanych poszczególnymi metodami NDT, a także będzie podstawowym dokumentem przy opracowywaniu procedur w procesie projektowania, wytwarzania i badania nietypowych konstrukcji stalowych. Nowe normy EN uwzględniają postęp techniki, w tym wymagania dla skomputeryzowanej aparatury NDT oraz możliwości prezentacji 2D i 3D wyników badań. Warto i należy śledzić zmiany wymagań w nowych normach PN, ale także trzeba je publikować w języku polskim.

7. Literatura/References

- [1] PN-EN 1993-1-2:2006P Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów. Część 1-9: Zmęczenie i in.
- [2] PN-EN 1090-2+A1:2012/Ap1:2014P Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych. Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych
- [3] Bródka J., Kozłowski A., Ligocki I., Łągona J., Ślęczka L.: Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych. Tom 1. Wydawnictwo PWT 2012 i Tom 2. Wydawnictwo DIK 2015
- [4] PN-EN ISO 5817:2014E : Spawanie. Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązek). Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych.
- [5] PN-EN ISO 6520-1:2009P: Spawanie i procesy pokrewne. Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach. Część 1: Spawanie
- [6] PN-EN ISO 17635:2010E: Badania nieniszczące spoin. Zasady ogólne dotyczące metali
- [7] PN-EN ISO 17637:2011E: Badania nieniszczące spoin. Badania wizualne złączy spawanych
- [8] BS-EN ISO 10675-1: 2016E publikacja 31.01.2017 (zastępuje EN ISO 10675-1:2013). PN-EN ISO 10675-1:2013E: Badania nieniszczące spoin. Poziomy akceptacji przy badaniach radiograficznych. Część 1: Stal, nikiel, tytan i ich stopy
- [9] PN-EN ISO 11666:2011P: Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe złączy spawanych. Poziomy akceptacji
- [10] PN-EN ISO 23277:2015E: Badania nieniszczące spoin. Badania penetracyjne złączy spawanych. Poziomy akceptacji
- [11] PN-EN ISO 23278:2015E: Badania nieniszczące spoin -- Badania magnetyczne proszkowe złączy spawanych. Poziomy akceptacji
- [12] PN-EN ISO 9712:2012P: Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących
- [13] Document IIW XV-521-82: Permissible weld discontinuities static loading
- [14] Document IIW-1823-07ex XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07 December 2008: Recommendations for fatigue design of welded joints and components. This document is a revision of XIII-1539-96 / XV-845-96
- [15] Wichtowski B.: Ocena zmęczenia i doboru stali na konstrukcje stalowych mostów spawanych wg Eurokodu 3, Przegląd Spawalnictwa 12/2009
- [16] Biłous, P. Łagoda, T. Działanie karbu strukturalnego w stalowych złączach spawanych Przegląd Spawalnictwa 12/2008
- [17] F. D. Antonio, G. Carratino, I. Paci Use of NDT computerized ultrasonic method with phased array technique in substitution of radiographic method on butt welds of type C independent tanks. 10 ECNDT w Moskwie 2010
- [18] Morawski T., Zmiany w ustalaniu poziomów jakości złączy spawanych według normy EN ISO 5817: 2014. Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych „Popów 2014”
- [19] Morawski T., Badanie złączy spawanych według aktualnych Polskich Norm. Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych „Popów 2015”

- 1) Prof. zw. dr inż. dr h.c. Ryszard Sikora, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 2) Prof. dr hab. inż. Jerzy Nowacki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 3) Dr inż. Przemysław Łopato, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 4) Dr Barbara Grochowalska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 5) Mgr inż. Marek Lipnicki, Koli sp. z o.o.
- 6) Dr hab. inż. Jacek Szelażek, prof. IPPT, IPPT PAN
- 7) Dr inż. Michał Kawiak, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
- 8) Dr inż. Grzegorz Psuj, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie