

Aluminium w budowie zbiorników ciśnieniowych - Wymagania dotyczące materiałów rodzajów złączy technologii spawania kontroli i badań wg PN-EN 13445-8:2009

Aluminium in the construction of pressure vessels
- Requirements for materials welding technology types
of joints controls and testing
according to PN-EN 13445-8: 2009

Streszczenie

W artykule przedstawiono wymagania dotyczące wytwarzania zbiorników ciśnieniowych z aluminium i jego stopów określone w PN-EN 13445-8:2009 [1]. Opisano szczegółowo zagadnienia obejmujące: wybór materiałów podstawowych, ograniczenia stosowania niektórych rodzajów złączy spawanych, technologię spawania oraz badania złączy spawanych.

Słowa kluczowe: zbiorniki ciśnieniowe; aluminium, technologia spawania

Abstract

The paper presents manufacturing issues for pressure vessels of aluminium and aluminium alloys specified in the standard of PN-EN 13445-8:2009 [1]. A choice of parent materials, limitations for some types of welded joints, welding procedures and examinations of welded joints have been described in details.

Keywords: pressure vessels; aluminium; welding procedure

Wstęp

Zbiorniki ciśnieniowe wytwarzane z aluminium i jego stopów stanowią grupę urządzeń ciśnieniowych dla których opracowywane są oddzielne, specjalne wymagania.

Celem artykułu jest przedstawienie wybranych zagadnień związanych z zastosowaniem aluminium i jego stopów do budowy zbiorników ciśnieniowych na podstawie PN-EN 13445-8:2009 [1], która jest zharmonizowana z dyrektywą ciśnieniową 97/23/WE.

Zakres niniejszej publikacji obejmuje wymagania dotyczące materiałów, rodzajów złączy, technologii spawania oraz badań połączeń spawanych.

W przypadku niektórych wymagań wprowadzono uzupełniające informacje zawarte w innych normach szczegółowych [2÷4,6,7].

Wymagania dotyczące materiałów

Spośród szerokiego asortymentu aluminium i jego stopów, do wytwarzania urządzeń ciśnieniowych stosuje się tylko niektóre ich rodzaje, w szczególności przerobione plastycznie przy czym stopy obrabiane cieplnie (utwardzane

wydzieleniowo) wykorzystać można w bardzo ograniczonym zakresie. Podstawę wyboru stanowią przede wszystkim następujące czynniki:

- własności mechaniczne (granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie, wytrzymałość zmęczeniowa),
- spawalność,
- odporność na korozję (w tym również na korozję naprężeniową i międzykrystaliczną).

Do wytwarzania urządzeń ciśnieniowych można stosować aluminium i jego stopy określone w tablicy I [1].

Skład chemiczny powinien odpowiadać specyfikacji materiałowej (PN-EN 573-3:2014-02 [5]) przy czym zawartość ołowiu nie może być większa niż 150 µg/g. Zaleca się aby materiał przeznaczony na elementy podlegające spawaniu wytworzony był z wlewków poddanych walcowaniu lub wyiskaniu o zawartości wodoru nie większej niż 0,2 ml/100 g mierzonej w ciekłym metalu podczas odlewania.

Aluminium i stopy aluminium stosowane do wytwarzania elementów spawanych, które w procesie produkcyjnym podlegają zabiegom przeróbki plastycznej na zimno powinny cechować się wydłużeniem nie mniejszym niż 14% (niezależnie od kierunku pobierania próbek) przy zachowaniu długości pomiarowej $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$

Tablica I. Aluminium i jego stopy przeznaczone do wytwarzania zbiorników ciśnieniowych
Table I. Aluminium and aluminium alloys for manufacturing of pressure vessels

Grupa wg ISO/TR 15608	Podgrupa wg ISO/TR 15608	Opis materiału	Oznaczenie		
			Numer EN AW	Symbol określający skład chemiczny	Stan
21		Czyste aluminium o łącznej zawartości składników stopowych lub domieszek $\leq 1\%$	EN AW – 1050A EN AW – 1070A EN AW – 1080A	EN AW – Al 99,5 EN AW – Al 99,7 EN AW – Al 99,8(A)	O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111, H112
22	Stopy nie obrabiane cieplnie				
	22.1	Stopy aluminium-mangan	EN AW – 3003 EN AW 3103 EN AW 3105	EN AW-Al Mn1 Cu EN AW-Al Mn1 EN AW-Al Mn0,5Mg0,5	O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111
	22.2	Stopy aluminium-magnez o zawartości Mg $\leq 1,5\%$	EN AW – 5005 EN AW – 5005A EN AW – 5050	EN AW-Al Mg1(B) EN AW-Al Mg1(C) EN AW-AlMg1,5(C)	O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111
	22.3	Stopy aluminium-magnez o zawartości $1,5\% < \text{Mg} \leq 3,5\%$	EN AW – 5049 EN AW – 5052 EN AW – 5154A EN AW – 5251 EN AW – 5454 EN AW – 5754	EN AW-Al Mg2Mn0,8 EN AW-Al Mg2,5 EN AW-Al Mg3,5(A) EN AW-Al Mg2 EN AW-Al Mg3Mn(A) EN AW-Al Mg3	O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111, H112 O, H111, H112
	22.4	Stopy aluminium-magnez o zawartości Mg $> 3,5\%$	EN AW – 5083 EN AW – 5086	EN AW-Al Mg4,5Mn0,7 EN AW-Al Mg4	O, H111, H112 O, H111
23	Stopy obrabiane cieplnie				
	23.1	Stopy aluminium-magnez-krzem	EN AW – 6060 EN AW – 6061	EN AW-Al MgSi EN AW-Al Mg1SiCu	T4 ^a T4 ^b , T6 ^c

^a wyłącznie dla kształtowników
^b wyłącznie dla rur bez szwu oraz kołnierzy
^c wyłącznie dla kołnierzy
Opis stanów wg [4]:
T4 – przesyciony i naturalnie starzony do uzyskania stabilnego stanu,
T6 – przesyciony a następnie sztucznie starzony,
H111 – stosuje się dla wyrobów, które po końcowym wyżarzeniu są tak dalece umocnione, że nie można ich klasyfikować jako wyżarzone, jednakże nie są umocnione w takim stopniu jak określa to stan H11,
H112 – stosuje się dla wyrobów, które częściowo cechuje stan odpowiadający przeróbce plastycznej na gorąco lub z określonej wielkości odkształcenia na zimno i dla których są określone własności mechaniczne,
O – wyżarzony.

Aluminium i stopy aluminium stosowane do wytwarzania elementów, które nie podlegają zabiegom przeróbki plastycznej na zimno powinny cechować się wydłużeniem nie mniejszym niż 10% (niezależnie od kierunku pobierania próbek) przy zachowaniu długości pomiarowej $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$

Opisane powyżej wymagania odpowiadają również zapisom w PN-EN 12392:2000 [3], która dodatkowo zawiera szereg innych informacji, w szczególności dotyczących warunków technicznych kontroli i dostawy wyrobów (blach, rur, oduwek), zdolności do spawania (procesami 141, 131, 15) oraz maksymalnych temperatur pracy dla poszczególnych rodzajów stopów.

W odniesieniu do zagadnienia kruchego pęknięcia i zastosowań w niskich temperaturach pracy norma [1] przywołuje punkt 4.3 normy PN-EN 1252-1 [2] zgodnie z którym ciągliwość aluminium i stopów aluminium jest wysoka w niskiej temperaturze.

Próby udarności nie są wymagane ponieważ aluminium i jego stopy nie wykazują krzywej przejścia w stan kruchy, która jest cechą charakterystyczną dla wielu rodzajów stali.

Wymagania szczegółowe dotyczące niektórych rodzajów złączy [1]

Złącza zakładkowe ze spoinami pachwinowymi w zbiornikach ciśnieniowych mogą być stosowane gdy spełnione są wszystkie z poniższych warunków:

- wybrano grupę badań 4 (zgodnie z tabl. III),
- materiały podstawowe należą do grup 21 lub 22 i wyszczególnione są w tablicy I,
- zastosowanie ograniczone jest dla przypadku połączenia płaszcza z dnem,
- największa nominalna grubość każdego z elementów w połączeniu nie przekracza 8 mm,
- minimalna wielkość zakładki wynosi 4e (e – największa grubość nominalna elementów w złączu),
- spoiny występują po obu stronach zakładki,
- maksymalna średnica zewnętrzna zbiornika nie przekracza 1600 mm,
- nie występuje ryzyko korozji.

Spoiny czołowe w złączu z występnym centrującym (rys. 1) w zbiornikach ciśnieniowych mogą być stosowane gdy spełnione są wszystkie z poniższych warunków:

- materiały podstawowe należą do grup 21 lub 22 i wyszczególnione są w tablicy I przy czym niedopuszczalne jest stosowanie stopu 5454,
- zastosowanie ograniczone jest dla przypadku połączenia płaszcza z dnem,
- największa nominalna grubość każdego z elementów w połączeniu nie przekracza 12 mm,
- brak ryzyka korozji od strony wewnętrznej zbiornika,
- obszar przecięcia spoiny wzdłużnej z obwodową powinien być poddany badaniom radiograficznym w celu zapewnienia, że nie występują niezgodności niedopuszczalne,
- maksymalna średnica zewnętrzna zbiornika nie przekracza 1600 mm.



Rys. 1. Spoina czołowa w złączu z występnym centrującym
Fig. 1. Test joint made of S690QL steel plate

Podkładki pozostające mogą być stosowane wyłącznie w przypadku złączy obwodowych oraz złączy blach do wytwarzania płaszczy oraz den zbiorników gdy spełnione są wszystkie z poniższych warunków:

- badania nieniszczące są wykonywane odpowiednio do wartości współczynnika złącza przy zachowaniu kryteriów jakości i akceptacji charakterystycznych dla spoin doczołowych jednostronnych,
- brak ryzyka korozji od strony wewnętrznej zbiornika,
- materiał podkładki powinien należeć do tej samej podgrupy co materiał zbiornika chyba, że przeprowadzono oddzielne kwalifikowanie technologii spawania dla innego materiału podkładki.

Kwalifikowanie technologii spawania oraz egzaminowanie spawaczy

Kwalifikowanie technologii spawania powinno być przeprowadzone zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 15614-2:2008. Uwzględnić należy jednak dodatkowe wymagania opisane w normie wyrobu [1]:

- dla blach o grubości równej lub większej niż 20 mm wymagane jest przeprowadzenie próby rozciągania wzdłużnego spoiny zgodnie z PN-EN 876:1999 w celu określenia wartości granicy plastyczności Re, wytrzymałości na rozciąganie Rm oraz wydłużenia A,
 - zakres kwalifikacji dla grubości materiału podstawowego w przypadku spoin czołowych jednościgowych w złączu jednostronnym lub dwuścigowych w złączu dwustronnym (po jednym ściegu z każdej strony) ograniczony jest do wartości 0,8t do t (gdzie t – grubość złącza próbnego).
- Egzaminowanie spawaczy powinno być realizowane na podstawie PN-EN ISO 9606-2.

Wymagania dotyczące technologii spawania

Norma [1] określa jedynie opisane poniżej wymagania dotyczące przygotowania brzegów łączonych elementów, podgrzewania wstępnego oraz obróbki cieplnej po spawaniu.

Podczas przygotowania brzegów elementów podlegających łączeniu przestrzegać należy następujących zasad:

- cięcie i ukosowanie może być wykonywane za pomocą obróbki mechanicznej lub procesów termicznych np. cięcia plazmowego. Dopuszczalne jest kształtowanie brzegów z zastosowaniem procesów hydro-mechanicznych;
- dla blach o grubości nie większej niż 25 mm dopuszcza się stosowanie wykrawania;
- wszystkie krawędzie niezależnie od stosowanego procesu cięcia powinny być poddane końcowej obróbce mechanicznej chyba, że wytwórca udowodni brak wpływu technologii cięcia na właściwości materiału podstawowego w szczególności jego spawalność;
- przed rozpoczęciem procesu spawania brzegi łączonych elementów powinny być poddane obróbce mechanicznej lub trawieniu w celu usunięcia tlenków aluminium i zanieczyszczeń. Niedopuszczalne jest stosowanie środków zawierających związki chloru.

Norma [1] nie obejmuje zagadnień doboru szczegółów złączy m.in. kąta ukosowania, odstępu, wysokości progu, podkładki, itp. W tym przypadku wykorzystać można zalecenia opisane w PN-EN ISO 9692-3:2004+A1:2005 [7].

Podgrzewanie wstępne aluminium i jego stopów nie jest wykonywane z uwagi na czynniki metalurgiczne. Zabieg ten może natomiast okazać się niezbędny w celu usunięcia wilgoci z powierzchni elementów. Norma zaleca wtedy podgrzewanie do temperatury ok. 50 °C. W przypadku stopów aluminium zawierających magnez w ilości równej lub większej od 3%, temperatura wstępnego podgrzewania oraz międzyścigowa równa lub większa od 150 °C może powodować pojawienie się na granicach ziaren wydzieleni fazy Al_3Mg_2 , które są przyczyną kruchości złącza.

Wyżarzanie odprężające po spawaniu nie powinno być stosowane za wyjątkiem przypadków gdy występuje ryzyko korozji naprężeniowej. Wyżarzanie w celu uzyskania właściwości charakterystycznych dla stanu dostawy 'O' jest jedynym dopuszczalnym rodzajem obróbki cieplnej po spawaniu, która powinna być przeprowadzana zgodnie ze specyfikacją materiału podstawowego. Dla złączy ze stopów aluminium grupy 23.1 obróbka cieplna po spawaniu jest niedopuszczalna.

Wytyczne dotyczące technologii spawania przedstawione są również w PN-EN 1011-4 [6], która nie jest przywołana w normie wyrobu [1] jako dokument odniesienia. Opisuje jednak w sposób bardziej szczegółowy omówione powyżej zagadnienia (za wyjątkiem obróbki cieplnej po spawaniu) oraz określa wytyczne dotyczące m.in. temperatury międzyścigowej, doboru spoiw i gazów osłonowych. Wymienia również podstawowe przyczyny niezgodności w złączach spawanych i proponuje odpowiednie działania zapobiegawcze.

Wykonanie i badania produkcyjnych płyt próbnych w odniesieniu do złączy spawanych [1]

W trakcie procesu produkcyjnego zbiorników ciśnieniowych wykonuje się płyty próbne, które podlegają odpowiednim badaniom w celu zapewnienia, że technologię spawania wdrożono właściwie a elementy ciśnieniowe cechują się odpowiednimi właściwościami.

Podczas wytwarzania zbiorników ciśnieniowych obowiązują następujące zasady:

- a) dla złączy spawanych w zbiornikach kwalifikowanych do grupy badań 4 (zgodnie z tabl. III) nie wymaga się przeprowadzania badań produkcyjnych;

b) dla aluminium i jego stopów z grup 22.1, 22.2, 22.3 (za wyjątkiem stopu 5454) oraz 22.4 badania produkcyjne nie są wymagane jeżeli występują jednocześnie następujące warunki:

- spełnione są wymagania jakościowe w spawalnictwie określone w normach PN-EN ISO 3834-2 lub -3;
- proces spawania jest w pełni zmechanizowany,
- Instrukcja Technologiczna Spawania nie zawiera wymagań dotyczących podgrzewania wstępnego lub obróbki cieplnej po spawaniu;
- grubość nominalna ścianki zbiornika nie przekracza 30 mm;

c) w przypadkach innych niż określone w pkt a) lub b) liczba płyt próbnych jest następująca:

- 1 płyta próbna na zbiornik dla spoin wzdłużnych gdy współczynnik wytrzymałości złącza jest równy 1;
- 1 płyta próbna na każde 200 m spoin wzdłużnych w przypadku współczynnika wytrzymałości złącza 0,85 lub połączeń elementów den za wyjątkiem den kulistych gdy ww. współczynnik jest równy 1;
- 1 płyta próbna na rok dla spoin czołowych obwodowych w złączach z występnym centrującym lub z podkładką pozostającą;

Po badaniach z wynikiem pozytywnym 10 kolejnych płyt próbnych można zmniejszyć zakres w sposób następujący:

- 1 płyta próbna na każde 200 m spoin wzdłużnych gdy współczynnik wytrzymałości złącza jest równy 1;
- 1 płyta próbna na każde 1500 m spoin wzdłużnych gdy współczynnik wytrzymałości złącza jest równy 0,85 lub połączeń elementów den za wyjątkiem den kulistych gdy ww. współczynnik jest równy 1;
- 1 płyta próbna na rok dla spoin czołowych obwodowych w złączach z występnym centrującym lub z podkładką stapianą.

Zakres badań płyt próbnych opisano w tablicy II.

techniką wielościową metodami 131 i 141. Specjalne podejście wymagane jest dla złączy wzdłużnych wykonywanych z zastosowaniem:

- innych procesów spajania, np. 15 (spawanie plazmowe), 51 (spawanie elektronowe), 42 (zgrzewanie tarciove);
- spawania techniką jednościową (dotyczy również przypadku złączy dwustronnych gdy z każdej strony ułożony jest tylko jeden ścieg);
- procesów spawania automatycznego (definicja procesu występuje w normach PN-EN 1418 oraz PN-EN ISO 14732).

Norma nie określa wytycznych dla ww. przypadków szczególnych za wyjątkiem spawania techniką jednościową złączy wzdłużnych. Można wykorzystać wtedy zapis występujący w pkt 6.6.2.3.2 normy PN-EN 13445-5 zgodnie z którym zakres badań może być zwiększony dwukrotnie, nie może być jednak mniejszy niż 25%.

Pamiętać również należy o szczegółowych zasadach postępowania gdy wymagany zakres badań jest mniejszy niż 100%. Obowiązują wtedy następujące wymagania dotyczące wyboru obszaru do badań:

a) złącza płaszczy, den po przeróbce plastycznej, komór komunikacyjnych i osłon:

- badania nieniszczące powinny być wykonane we wszystkich obszarach przecięcia się spoin wzdłużnych i obwodowych. Minimalna długość badania powinna wynosić 200 mm. Wymaganie powinno być stosowane nawet wtedy gdy włączenie wszystkich ww. obszarów powoduje przekroczenie zakresu procentowego wskazanego w tablicy IV;
- spoiny króćców w obrębie lub w odległości mniejszej niż 12 mm od spoin głównych (wzdłużnych lub obwodowych) powinny być poddane badaniom nieniszczącym na całej długości od strony zewnętrznej i wewnętrznej. Wymaganie to należy traktować jako dodatkowe w odniesieniu do zakresu badań określonego w tablicy IV;

b) wszystkie króćce i odgałęzienia połączone ze zbiornikiem spoinami czołowymi powinny podlegać grupowaniu w celu ustalenia zakresu badań:

- dla zakresu badań 100% – liczność grup wynosi 1 (t.j. badaniu podlega cała długość spoiny każdego króćca lub odgałęzienia),
- dla zakresu badań 25% – liczność grup wynosi 4 (t.j. badaniom podlega cała długość spoiny co najmniej jednego króćca lub odgałęzienia każdej z 4 grup),
- dla zakresu badań 10% – liczność grup wynosi 10 (t.j. badaniom podlega cała długość spoiny co najmniej jednego króćca lub odgałęzienia każdej z 10 grup).

Kontrola i badania zbiorników ciśnieniowych [1]

Podstawą wyznaczania rodzaju i zakresu badań dla zbiorników ciśnieniowych jest ich przyporządkowanie do tzw. grup badań zgodnie z tablicą III.

Bardzo ważnym zagadnieniem przy wyznaczaniu zakresu badań nieniszczących jest nie tylko posługiwanie się w odpowiedni sposób właściwą tabelą normy ale również uwzględnienie szeregu wymagań szczegółowych. Zakresy badań nieniszczących określone dla poszczególnych rodzajów złączy (tabl. IV) obowiązują wyłącznie dla spawania

Tablica II. Badania produkcyjnych płyt próbnych

Table II. Testing of production test plates

Gr. materiałów	Grubość nominalna e_n^a [mm]	Próbki do badań
21, 22.1, 22.2, 22.3, 22.4, 23.1	≤35	1 próbka dla próby gięcia z rozciąganiem od strony lica wg PN-EN 910:1999 1 próbka dla próby gięcia z rozciąganiem od strony grani wg PN-EN 910:1999 (dla grubości $e_n > 12$ mm można zastosować 2 próbki dla zginania bocznego) wg PN-EN 910:1999 1 próbka dla próby rozciągania poprzecznego wg PN-EN 895:1997 1 próbka dla badań makroskopowych wg PN-EN 1321:2000
	≥35	2 próbki dla zginania bocznego wg PN-EN 910:1999 1 próbka dla próby rozciągania poprzecznego wg PN-EN 895:1997 1 próbka dla badań makroskopowych wg PN-EN 1321:2000 1 próbka dla próby rozciągania wzdłużnego wg PN-EN 876:1999

^a W przypadku połączenia elementów o różnych grubościach przyjąć należy wartość mniejszą

Tablica III. Grupy badań dla zbiorników ciśnieniowych wytwarzanych z aluminium i jego stopów

Table III. Testing groups for aluminium pressure vessels

	Grupy badań			
	1	2a	3	4 ^h
Materiały podstawowe ^e	21, 22.1 do 22.4	21, 22.1 do 22.4 23.1 ^g	21, 22.1 do 22.4 23.1 ^g	21, 22.1 do 22.4 (za wyjątkiem EN AW 5454)
Zakres badań NDT dla głównych złączy spawanych ^{c,f}	100%	100% - 10% ^b	10%	0%
Badania NDT dla innych złączy spawanych	Określono dla każdego rodzaju złącza w tabeli IV			
Współczynnik złącza	1	1	0,85	0,7
Maksymalna grubość ścianki dla której można stosować materiały podstawowe	Brak ograniczeń ^d	40 mm	40 mm	20 mm
Proces spawania	Brak ograniczeń ^d	Spawanie zmechanizowane ^a	Brak ograniczeń ^d	Brak ograniczeń ^d
Zakres temperatury roboczej	Brak ograniczeń ^d	Brak ograniczeń ^d	Brak ograniczeń ^d	Brak ograniczeń ^d

^a Definicja ww. procesu występuje w PN-EN 1418 oraz PN-EN ISO 14732

^b Zakres 100% może dotyczyć każdego przypadku natomiast 10% - po spełnieniu warunku 'zadowalającego doświadczenia'.

Termin 'zadowalające doświadczenie' dotyczy minimalnej liczby zbiorników lub długości spoin wykonanych według odpowiedniej kwalifikowanej technologii i poddanych badaniom z wynikiem pozytywnym. Obowiązują następujące zasady:

- w przypadku grup materiałów 21, 22.1 do 22.4 za wyjątkiem EN AW 5454 – 25 kolejnych zbiorników lub 50 m głównych złączy spawanych,
- w przypadku materiałów grupy 23.1 oraz EN AW 5454 - 50 kolejnych zbiorników lub 100 m głównych złączy spawanych;
- wykazanie 'zadowalającego doświadczenia' w odniesieniu do grupy materiałów 22.4 powoduje, że spełniony jest również ten warunek dla grup materiałów 21, 22.1, 22.2 i 22.3,
- gdy dowolna niezgodność wymaga naprawy to procedura wykazania 'zadowalającego doświadczenia' musi być rozpoczęta ponownie.

^c Patrz szczegóły dotyczące badań opisane w tablicy IV,

^d Termin 'Brak ograniczeń' dotyczy wyłącznie badań. Norma wprowadza wiele innych ograniczeń związanych np. z projektowaniem, zastosowaniem materiałów w określonych temperaturach roboczych, itp.

^e Patrz tablica I,

^f Procent spoin w określonym zbiorniku,

^g W przypadku stopu grupy 23.1:

- poszczególne główne elementy ciśnieniowe (np. płaszcz, dna, kołnierze) oraz połączenia króćców nie mogą być wytwarzane jako spawane; dopuszcza się wyłącznie spoiny obwodowe łączące oddzielne elementy,
- niedopuszczalna jest przeróbka plastyczna na zimno.

^h Grupę można stosować dla maksymalnego dopuszczalnego ciśnienia PS ≤ 20 bar, maksymalnej liczba cykli ≤ 500 oraz niższego poziomu nominalnych naprężeń projektowych (zgodnie z PN-EN 13445-3:2009)

Tablica IV. Zakres badań nieniszczących

Table IV. Extent of non destructive testing

			Grupa badań	1	2	3	4
			Materiały podstawowe	21, 22.1 do 22.4	21, 22.1 do 22.4	21, 22.1 do 22.4 i 23.1 ^o	21, 22.1 do 22.4 (za wyjątkiem EN AW 5454)
Rodzaj spoiny ^a			Rodzaj badania ^b	Zakres badania			
Spoiny czołowe z pełnym przetopem	1	Złącze wzdłużne	RT lub UT PT	100% 0	(100-10)% ^p 0	10% ^p 0	0 ^p 0
	2a	Złącze obwodowe płaszczu	RT lub UT PT	25% 0	(25-10)% 0	10% ^c 0	0 0
	2b	Złącze obwodowe płaszczu z podkładką pozostającą ^k	RT lub UT PT	25% 0	(25-10)% 0	10% 0	0 0
	2c	Złącze obwodowe z występem centrującym ze spoiną czołową ^k	RT lub UT PT	25% 0	(25-10)% 0	10% 0	0 0
	3a	Złącza obwodowe króćców dla Di>150 mm lub e>16 mm	RT lub UT PT	25% 0	(25-10)% 0	10% ^c 0	0 0
	3b	Złącza obwodowe króćców dla Di>150 mm lub e>16 mm z podkładką pozostającą ^k	RT lub UT PT	25% 0	(25-10)% 0	10% 0	0 0
	4	Złącza obwodowe króćców dla Di<150 mm lub e<16 mm	RT lub UT PT	0 50%	0 (50-10)%	0 10% ^d	0 0
	5	Wszystkie spoiny płaszczu, den oraz spoiny łączące płaszcz z dnem kulistym	RT lub UT PT	100% 0	100% 0	10% ^p 0	0 ^p 0
	6	Połączenie płaszczu stożkowego o kącie ≤30° z płaszczem cylindrycznym	RT lub UT PT	25% 0	(25-10)% 0	10% 0	0 ^p 0
	7	Połączenie płaszczu stożkowego o kącie >30° z płaszczem cylindrycznym	RT lub UT PT	100% 0	(100-25)% 0	10% 10% ^d	10% 0

			Grupa badań	1	2	3	4
			Materiały podstawowe	21, 22.1 do 22.4	21, 22.1 do 22.4	21, 22.1 do 22.4 i 23.1 °	21, 22.1 do 22.4 (za wyjątkiem EN AW 5454)
Rodzaj spoiny ^a			Rodzaj badania ^b	Zakres badania			
Spoiny czołowe z pełnym przetopem	7	Połączenie płaszcza stożkowego o kącie >30° z płaszczem cylindrycznym	RT lub UT PT	100% 0	(100-25)% 0	10% 10% ^d	10% 0
Spoiny pachwinowe w złączach zakładkowych ^k	8	Połączenie zakładkowe dna z płaszczem	RT lub UT PT	NA NA	NA NA	NA NA	0 ^p 0
Złącza den płaskich lub ścian sitowych z płaszczem; Złącza kołnierzy z płaszczem	9	Z pełnym przetopem	RT lub UT PT	25% 0	(25-10)% 0	10% 0 ^p	0 ^p 0 ^p
	10	Bez pełnego przetopu jeżeli a>16 mm (rys. 3)	RT lub UT PT	NA NA	NA NA	10% 0	0 0
	11	Bez pełnego przetopu jeżeli a<16 mm (rys. 3)	RT lub UT PT	NA NA	NA NA	0 10%	0 0
Złącza kołnierzy z króćcem gdy dn>200 mm i ≥25a	12	Z pełnym przetopem	RT lub UT PT	NA 25% ^g	NA (25-10)%	NA 10%	0 0
	13, 14	Bez pełnego przetopu j	RT lub UT PT	NA NA	NA NA	NA 10% ^{d p}	0 0 ^p
Złącza króćców lub odgałęzień	15	Z pełnym przetopem jeżeli Di>200 mm i e>25 mm	RT lub UT PT	25% ^g 0 ^p	(100-10)% 0 ^p	10% 0 ^p	0 0 ^p
	16	Z pełnym przetopem jeżeli Di≤200 mm i e≤25 mm	RT lub UT PT	NA 25% ^{g p}	NA (25-10)% ^p	NA 10% ^{d p}	0 0 ^p
	17, 18, 19	Bez pełnego przetopu niezależnie od wymiaru Di i a> 16 mm (rys. 4)	RT lub UT PT ^j	NA 25% ^{g p}	NA (25-10)% ^p	NA 10% ^{d p}	0 0 ^p
Złącza rur ze ścianami sitowymi	20		PT lub próba szczelności ^q	100%	100%	10%	0
Stałe zamocowania ^f	21	Z lub bez pełnego przetopu	RT lub UT PT	0 25% ^p	0 25% ^p	0 25% ^p	0 0 ^p
Obszary elementów ciśnieniowych po usunięciu zamocowań	22		PT	100%	100%	100%	0 ^p
Platerowanie metodami spawalniczymi ^h	23		PT	NA	NA	NA	NA
Naprawy	24	RT lub UT, PT	Badania NDT powinny obejmować 100% obszaru podlegającego naprawie. Metoda badania powinna być wybrana w odniesieniu do rodzaju spoiny zgodnie z wymaganiami określonymi w niniejszej tabl.				

^a Patrz rysunek 2,

^b Rt – badania radiograficzne, UT – badania ultradźwiękowe, MT – badania magnetyczne, PT – badania penetracyjne,

^c 2% jeżeli e≤30 mm dla grup materiałów 21, 22.1 do 22.4 (za wyjątkiem EN AW 5454),

^d 10% jeżeli e>30 mm lub materiał należy do grupy 23.1, 0% jeżeli e≤30 mm (za wyjątkiem materiału należącego do grupy 23.1),

^e Zakres procentowy określony w tabeli dotyczy łącznej długości spoin wszystkich króćców,

^f Badania RT lub UT nie są wykonywane dla grubości spoin ≤16 mm,

^g 10% dla grupy materiałowej 21,

^h Platerowanie z wykorzystaniem procesów spawania nie jest stosowane dla stopów aluminium,

ⁱ Możliwość zmniejszenia zakresu badań dla materiałów grupy 2 opisano w tablicy III (uwaga b),

^j W wyjątkowych przypadkach np. z uwagi na rozwiązanie projektowe może być konieczne zastosowanie obu metod badania

^k Występują ograniczenia związane z zastosowaniem tego typu połączenia opisane w niniejszym artykule,

^l Zakres procentowy badanej powierzchni odnosi się do długości spoin zarówno po stronie wewnętrznej (jeżeli występuje dostęp) jak i zewnętrznej,

^m Gdy w niniejszej tabeli określono: RT lub UT oraz PT to powinny być wykonane we wskazanym zakresie,

ⁿ NA oznacza 'nie stosowane',

^o Poszczególne elementy ciśnieniowe wykonane z materiału grupy 23.1 nie mogą być wytwarzane z wykorzystaniem procesu spawania (np. płaszczy zbiornika, dna, kołnierze oraz połączenia króćców bez szwu). Dopuszczalne są wyłącznie spoiny obwodowe łączące oddzielne elementy ciśnieniowe.

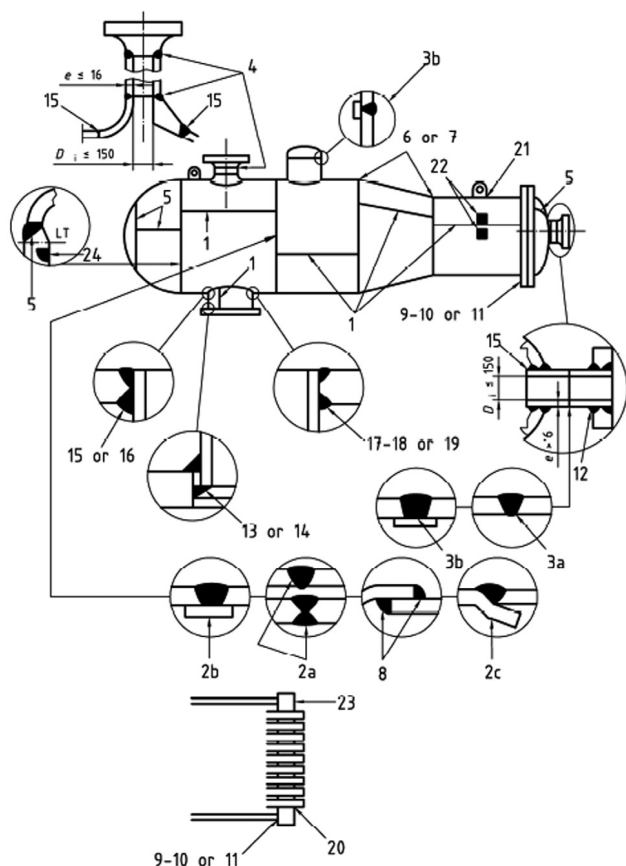
^p Gdy zbiornik podlega próbie pneumatycznej to uwzględnić należy następujące dodatkowe wymagania dotyczące zakresu badań NDT:

- RT lub UT - 100% spoin wzdłużnych,

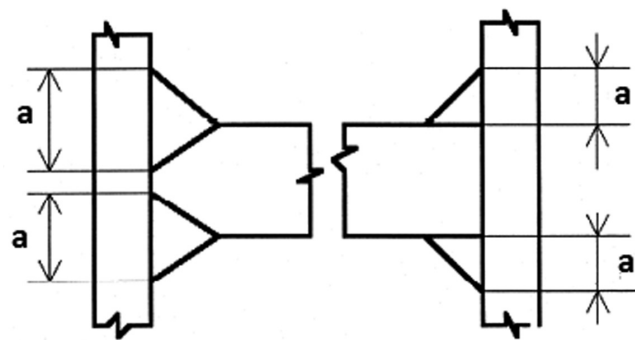
- RT lub UT – co najmniej 10% spoin obwodowych łącznie ze wszystkimi złączami typu 'T',

- PT gdy grubość spoin przekracza 6,5 mm – 100% spoin: łączących króćce z płaszczem, elementów dodatkowych z powłokami ciśnieniowymi, den płaskich z płaszczem oraz obszary z których usunięto elementy zamocowane tymczasowo (np. uchwyty montażowe),

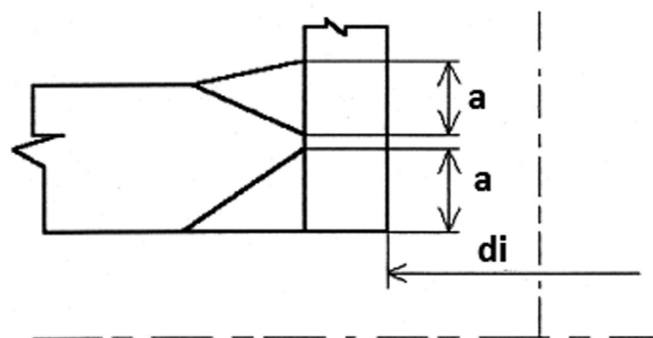
^q Próba szczelności o czułości minimum 10⁻³ atm-ml/s



Rys. 2. Rodzaje złączy spawanych w zbiornikach ciśnieniowych
Fig. 2. Types of welded joints in pressure vessels



Rys. 3. Definicja wymiaru 'a' dla spoin nr 10 i 11
Fig. 3. Definition of 'a' dimension for welds no. 10 and 11



Rys. 4. Definicja wymiaru 'a' dla spoin nr 17, 18 i 19
Fig. 4. Definition of 'a' dimension for welds no. 17, 18 and 19

Techniki badań, charakterystykę wskazań oraz kryteria akceptacji dla poszczególnych metod badania zbiorników ciśnieniowych określa tablica V.

Tablica V. Techniki badań, charakterystyka wskazań oraz kryteria akceptacji dla poszczególnych metod badania
Table V. NDT methods, techniques, characterisation, acceptance criteria

Metody badań	Technika badania	Charakterystyka wskazań	Kryteria akceptacji
Badania wizualne (VT)	PN-EN 970:1999	PN-EN ISO 10042:2008	PN-EN ISO 10042:2008 – kryteria akceptacji określono w tablicy VI ^c
Badania radiograficzne (RT)	PN-EN 1435:2001, Klasa B ^a	PN-EN ISO 10042:2008	PN-EN ISO 10042:2008 – kryteria akceptacji określono w tablicy VII
Badania ultradźwiękowe (UT)	PN-EN 1714:2002 dla grubości t (mm): t < 40: klasa A, 40 ≤ t < 100: klasa B t ≥ 100: klasa C	PN-EN 1713:2002 ^b	PN-EN 1712:2001; poziom akceptacji 2 (niedopuszczalne są jakiegokolwiek niezgodności płaskie)
Badania penetracyjne (PT)	PN-EN 571-1:1999, PN-EN 1289:1998, tabela A.1	PN-EN 1289:2000	PN-EN 1289:2000 – kryteria akceptacji określono w tablicy VIII

^a Jednak maksymalny obszar dla pojedynczej ekspozycji powinien odpowiadać wymaganiom klasy A wg PN-EN 1435:1997,

^b PN-EN 1713 jest jedynie dokumentem zalecanym,

^c Wymagania dodatkowe dla następujących niezgodności:

- zajarzenie łuku (601) – konieczne usunięcie i następnie przeprowadzenie badań penetracyjnych w zakresie 100%,
- rozprysk (602) – niezgodność powinna być usunięta ze wszystkich elementów ciśnieniowych oraz elementów dodatkowych przenoszących obciążenia,
- naderwanie powierzchni (603) oraz ślady dutowania (605) – niezgodność podlega szlifowaniu aż do uzyskania łagodnego przejścia,
- przeszlifowanie (606) jest niedopuszczalne. Jakiegokolwiek niezgodność tego typu powinna być rozpatrywana w odniesieniu do charakterystyki konstrukcyjnej.

Kryteria akceptacji dla poszczególnych metod badań zbiorników ciśnieniowych wyszczególniono w tablicach VI÷VIII.

Tablica VI. Kryteria akceptacji dla badań wizualnych

Table VI. Acceptance criteria for visual testing

Nr niezgodności wg PN-EN ISO 6520:2009 ^a	Opis niezgodności	Dopuszczalny poziom jakości ^a
502	Nadlew spoiny czołowej	PN-EN ISO 10042:2008 – poziom C
503	Nadmierna wypukłość spoiny pachwinowej	PN-EN ISO 10042:2008 – poziom C
504	Wyciek	PN-EN ISO 10042:2008 – poziom C
507	Przesunięcie liniowe	Zgodnie z wymaganiami pkt 5.2 i 5.3 normy PN-EN 13445-4:2009
^a Dla innych niezgodności wymagany jest poziom jakości B wg PN-EN ISO 10042:2008		

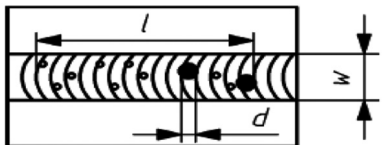
Tablica VII. Kryteria akceptacji dla badań radiograficznych

Table VII. Acceptance criteria for radiographic testing

Nr niezgodności wg PN-EN ISO 6520:2009 ^a	Opis niezgodności	Dopuszczalny poziom jakości ^a
2016	Pęcherz kanalikowy pojedynczy	PN-EN ISO 10042:2008 – poziom C
	Pęcherze kanalikowe zgrupowane	Niezgodność niedopuszczalna
303	Wtrącenie tlenu	PN-EN ISO 10042:2008 – poziom C
3041	Wtrącenie metaliczne wolframu	PN-EN ISO 10042:2008 – poziom C
2011	Pęcherz gazowy	PN-EN ISO 10042:2008 – poziom C
2013	Skupisko porowatości (umiejscowione)	PN-EN ISO 10042:2008 – poziom C
^a Dla innych niezgodności wymagany jest poziom jakości B wg PN-EN ISO 10042:2008		

Tablica VIII. Kryteria akceptacji dla badań radiograficznych

Table VIII. Acceptance criteria for radiographic testing

Rodzaj wskazań	Określenie poziomu dopuszczalnego	
	t≤10 mm	t>10 mm
Wskazania liniowe	PN-EN 1289:2000, poziom 1	PN-EN 1289:2000, poziom 1
Wskazania nieliniowe	PN-EN 1289:2000, poziom 1	PN-EN 1289:2000, poziom 2
Dodawanie wskazań liniowych i nieliniowych 	Niezdolności dopuszczalne jeżeli pole powierzchni niezgodności jest ≤ 0,5% pola powierzchni spoiny poddawanej analizie (Lxw) Skupisko wskazań jest niedopuszczalne	

Wybór metody badań nieniszczących objętościowych przeprowadzany jest zgodnie z tablicą IX, która odpowiada wymaganiom określonym w tabeli 3 normy PN-EN 12062:2000 (metoda badania ujęta w nawias oznacza, że jej zakres stosowania jest ograniczony).

Tablica IX. Wybór metody badań nieniszczących a c dla niezgodności wewnętrznych
Table IX. Selection of non destructive testing method a c for determining internal imperfections

Aluminium i jego stopy	Nominalna grubość e materiału podstawowego [mm]			
Rodzaj złącza	e≤8	8<e≤40	40<e≤100	e>100
Złącza doczołowe z pełnym przetopem	RT klasa B lub (UT klasa A)	RT klasa B lub (UT klasa A)	RT klasa B lub UT ^b klasa B	UT ^b klasa C
Złącza typu T ze spoiną czołową z pełnym przetopem	RT klasa B lub UT klasa A	UT klasa A lub (RT klasa B)	UT klasa B lub (RT klasa B)	UT klasa C
Złącza doczołowe lub typu T bez pełnego przetopu	Grubość spoiny a [mm]			
	a>16 mm – RT klasa B lub UT klasa A			

^a RT i UT oznaczają odpowiednio badania radiograficzne i ultradźwiękowe wykonywane wg norm wyszczególnionych w tablicy V,

^b Dla e≥60 mm badania UT powinny obejmować niezgodności prostopadłe do powierzchni zgodnie z PN-EN 583-4:2003,

^c W niektórych, specjalnych przypadkach wynikających ze stosowanego rozwiązania konstrukcyjnego może okazać się konieczne zastosowanie obu metod badania, np. w przypadku złączy z niepełnym przetopem

Norma [1] oprócz opisanych powyżej zagadnień wprowadza także szczegółowe wymagania dotyczące dopuszczalnych naprężeń projektowych, przeróbki plastycznej, obróbki cieplnej po przeróbce plastycznej a także próby ciśnieniowej (hydraulicznej oraz pneumatycznej).

Podsumowanie

Norma PN-EN 13445-8:2009 uregulowała w znacznym stopniu wytwarzanie zbiorników ciśnieniowych z aluminium i jego stopów. Artykuł ukazuje złożoność wymagań wprowadzanych przez normy europejskie dotyczące poszczególnych rodzajów wyrobów. Personel nadzoru spawalniczego wytwórcy powinien wykazać się dlatego szeroką oraz szczegółową wiedzą ponieważ możliwość nie uwzględnienia jakiegokolwiek z ww. wymagań może zwiększyć ryzyko związane z eksploatacją urządzeń ciśnieniowych.

Literatura

- [1] PN-EN 13445-8:2009 Nieogrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe – Część 8: Dodatkowe wymagania dotyczące zbiorników ciśnieniowych wykonanych z aluminium lub stopu aluminium.
- [2] PN-EN 1252-1:2002 – Zbiorniki kriogeniczne. Materiały. Część 1: Wymagania dotyczące ciągłości w temperaturze poniżej -80 °C.
- [3] PN-EN 12392:2004 Aluminium i stopy aluminium – Wyroby przerobione plastycznie – Specjalne wymagania dla wyrobów przeznaczonych do wytwarzania urządzeń ciśnieniowych.
- [4] PN-EN 515:1996 Aluminium i stopy aluminium – Wyroby przerobione plastycznie – Oznaczenia stanów.
- [5] PN-EN 573-3:2014-02 Aluminium i stopy aluminium – Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie – Część 3: Skład chemiczny i rodzaje wyrobów.
- [6] PN-EN 1011-4:2002 – Spawanie. Wytyczne dotyczące spawania metali. Część 4: Spawanie łukowe aluminium i stopów aluminium.
- [7] PN-EN ISO 9692-3:2004+A1:2005 – Spawanie i procesy pokrewne. Zalecenia dotyczące przygotowanie złączy. Część 3: Spawanie aluminium i jego stopów elektrodą metalową i elektrodą wolframową w osłonie gazów obojętnych.