

Elementy niezawodności stalowych spawanych zbiorników na ciecze i gazy płynne

Elements of the structural reliability of steel welded tanks liquids and gases in liquid

Streszczenie

W artykule przedstawiono ogólne zasady zarządzania niezawodnością stalowych spawanych zbiorników na ciecze wg eurokodów EN 1990 i EN 1993-4-2 oraz podano podstawy ich obliczeń i wymiarowania w stanie zniszczenia plastycznego ze szczególnym uwzględnieniem imperfekcji montażowych i spawalniczych. Przeprowadzono weryfikację współczynników nośności plastycznej krajowych wyrobów hutniczych wyprodukowanych w latach 1963-1968 oraz 1976-1980. Sposób wykorzystania procedur normowych w stanie plastycznym zilustrowano przykładem liczbowym obliczeń statycznych i wymiarowania powłoki stalowego zbiornika stożkowego przeznaczonego do magazynowania wody amoniakalnej.

Abstract

The paper presents general rules for the management of structural reliability of weld steel tanks for liquids according to Eurocodes EN 1990 and EN 1993-4-2. Basis of design in plastic limit state, including assembly and welding imperfections, are presented too. Verification of the national partial safety factor for plastic limit state of steel products produced in the years 1963-1968 and 1976-1980 was achieved. Calculations of steel tank for ammonia water are example of design of structures in plastic limit state according to Eurocode rules.

Wstęp

Prezentowana analiza niezawodności spawanych stalowych naziemnych zbiorników walcowych na ciecze i gazy płynne, dotyczy konstrukcji projektowanych wg reguł i zasad eurokodu PN-EN 1993-4-2 [1]. Są to zbiorniki, które spełniają następujące warunki:

1. Charakterystyczne ciśnienie wewnętrzne w przestrzeni powietrzno-gazowej jest nie mniejsze niż -100 mbar ($-10,0$ kPa) i nie większe niż 500 mbar ($50,0$ kPa).
2. Obliczeniowa temperatura powłoki zbiornika zawiera się w przedziale od -50°C do $+300^{\circ}\text{C}$, a dla zbiorników wykonanych ze stali odpornych na korozję (wg PN-EN 10028 [2]) przedział dopuszczalnej temperatury wynosi $-165\div 300^{\circ}\text{C}$.

3. Maksymalny obliczeniowy poziom składowanej cieczy zawiera się w przestrzeni walcowej zbiornika (nie jest zapełniana przestrzeń stożkowa pod dachem zbiornika).
4. Wytwarzanie i montaż zbiorników podlegają wymaganiom norm EN 14015 [3], EN 14620 [4] oraz EN 1090 [5].

Wskazany zakres dopuszczalnego ciśnienia w przestrzeni powietrzno-gazowej zbiorników jest zbieżny z wymaganiami krajowymi sformułowanymi w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki dla zbiorników bezciśnieniowych i niskociśnieniowych podlegających dozorowi Urzędu Dozoru Technicznego [6].

Inny podział zbiorników, przyjęty w eurokodzie PN-EN 1993-4-2, wiąże się z klasą konsekwencji (wg klasyfikacji przyjętej w PN-EN 1990 [7] jak poniżej):

1. Klasa konsekwencji CC3, która obejmuje zbiorniki o dowolnej pojemności na ciecze i gazy płynne – toksyczne lub wybuchowe oraz zbiorniki o dużej pojemności na ciecze palne lub szkodliwe dla środowiska wodnego w terenie zabudowanym.

2. Klasa konsekwencji CC2, która obejmuje zbiorniki o średniej pojemności na ciecze palne lub szkodliwe dla środowiska wodnego w terenie zabudowanym.
3. Klasa konsekwencji CC1, która obejmuje zbiorniki dla rolnictwa oraz zbiorniki na wodę.

W artykule przedstawiono ogólne zasady zarządzania niezawodnością stalowych zbiorników na ciecze oraz podano podstawy ich obliczeń i wymiarowania w stanie zniszczenia plastycznego ze szczególnym uwzględnieniem imperfekcji montażowych i spawalniczych. Sposób wykorzystania procedur normowych w stanie plastycznym zilustrowano przykładem liczbowym obliczeń statycznych i wymiarowania powłoki stalowego zbiornika stokażowego przeznaczonego do magazynowania wody amoniakalnej.

Elementy niezawodności zbiorników stalowych

W celu zróżnicowania niezawodności konstrukcji budowlanych PN-EN 1990 [7] definiuje klasy konsekwencji zniszczenia CC (wg opisu zamieszczonego w tablicy B1 normy). Klasy konsekwencji CC są powiązane z klasami niezawodności konstrukcji RC w ten sposób, że klasie konsekwencji CC3 odpowiada klasa niezawodności RC3, klasie CC2 – RC2 oraz klasie CC1 – RC1. Klasy niezawodności konstrukcji RC w stanie granicznym nośności są zdefiniowane w tablicy I (wg [7]), w zależności od zalecanej minimalnej wartości wskaźnika niezawodności β_u w okresie odniesienia $t = 1$ rok albo $t = 50$ lat.

Wskaźnik niezawodności β jest pojęciem znanym w teorii niezawodności konstrukcji budowlanych (por. np. [10]) w metodzie obliczeń probabilistycznych poziomu 2 – FORM (*First Order Reliability Method*). Wskaźnik β jest miarą niezawodności, którą można wyspecyfikować w badaniach statystycznych losowych obciążeń i losowej nośności konstrukcji budowlanych. Kryterium niezawodności konstrukcji budowlanych w metodzie probabilistycznej poziomu 2 o postaci:

$$\beta \geq \beta_u \quad (1)$$

w przypadku podstawowym można zastąpić porównaniem wartości obliczeniowych: nośności R_d i odpowiadającego jej efektu obciążeń E_d . W zaleceniach PN-EN 1990 dotyczących podstaw projektowania

Tablica I. Zalecane wartości wskaźnika niezawodności β w stanie granicznym nośności wg PN-EN 1990 [7]

Table I. Recommended values of factor for structural reliability β in the plastic limit state acc. to PN-EN 1990 [7]

Klasa niezawodności	Minimalne wartości β_u	
	okres odniesienia 1 rok	okres odniesienia 50 lat
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

konstrukcji rozpatruje się przypadek, w którym warunek stanu granicznego można wyrazić za pomocą skalarowej, jednoparametrowej nośności R i stowarzyszonego z nią efektu oddziaływań E w postaci:

$$\begin{aligned} E_d &= E\{F_{d1}, F_{d2}, \dots, a_{d1}, a_{d2}, \dots, \theta_{d1}, \theta_{d2}\} \leq R_d \\ R_d &= R\{X_{d1}, X_{d2}, \dots, a_{d1}, a_{d2}, \dots, \theta_{d1}, \theta_{d2}\} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: indeks „d” oznacza wartości obliczeniowe: F_{d1}, F_{d2}, \dots – oddziaływań na konstrukcję, X_{d1}, X_{d2}, \dots – właściwości mechaniczne materiału konstrukcji, a_{d1}, a_{d2}, \dots – właściwości geometrycznych konstrukcji, $\theta_{d1}, \theta_{d2}, \dots$ – parametrów niepewności modelu obliczeniowego.

W eurokodach przyjęto konwencję sprawdzania niezawodności, wg której wartości obliczeniowe x_d zwykle nie są podstawiane bezpośrednio do równania stanu granicznego, lecz są podstawiane tzw. wartości reprezentatywne X_{rep} i F_{rep} , którymi mogą być:

- wartości charakterystyczne, czyli kwantyle dla: obciążeń – F_k , wytrzymałości materiału – ηX_k i cech geometrycznych – a_d (gdzie η – współczynnik konwersji),
- wartości nominalne (wartości centralne cech geometrycznych a_{nom}).

Wartości obliczeniowe F_d i X_d otrzymuje się w takim razie, mnożąc lub dzieląc wartości reprezentatywne przez odpowiednie współczynniki częściowe:

$$F_d = F_{rep} \gamma_F \rightarrow E_d = E(F_{k/F} a_d) \quad (3)$$

$$X_d = \eta X_k / \gamma_M \rightarrow R_d = R(\eta X_k / \gamma_M a_d) \quad (4)$$

Współczynniki częściowe – γ_F we wzorze (3) i γ_M we wzorze (4) – uwzględniają losową zmienność oddziaływań, wytrzymałości materiału oraz błąd modelowania tych zmiennych losowych i można je zapisać w postaci iloczynów:

$$\gamma_F = \gamma_{f1} \gamma_{f2} \gamma_{f3} \gamma_M = \gamma_m \gamma_{Rd} \quad (5)$$

Wartości liczbowe współczynników obciążenia γ_F wyspecyfikowane w eurokodzie EN 1990 zostały zredagowane w postaci trzech zestawów, w zależności od analizowanego przypadku stanu granicznego [7]. Są

Tablica II. Zalecane wartości współczynników częściowych γ_F do oddziaływań na zbiorniki stalowe wg PN-EN 1993-4-2 [1]

Table II. Recommended values of partial factors γ_F to interaction on steel tanks acc. to PN-EN 1993-4-2 [1]

Sytuacja obliczeniowa	Rodzaj cieczy	γ_F do oddziaływań zmiennych od cieczy	γ_F do oddziaływań stałych
Obciążenia od cieczy podczas eksploatacji	ciecze toksyczne lub wybuchowe	1,40	1,35
	ciecze palne	1,30	1,35
	inne ciecze	1,20	1,35
Próba wodna	wszelkie ciecze	1,00	1,35
Oddziaływania wyjątkowe	wszelkie ciecze	1,00	–

Tablica III. Miary niezawodności wytrzymałości stali wyznaczone w próbach statystycznych krajowych wyrobów hutniczych z lat 1963-1968 wg [9] i 1976-1980 wg [10]

Table III. Values of reliability of steel strength achieved in static tests of steel products produced in the years 1963-1968 acc. to [9] and 1976-1980 acc. to [10]

Znak stali	Granica plastyczności R_e , MPa					Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa				
	\bar{R}_e	v_{Re}	β_R	β	γ_{M0}	\bar{R}_e	v_{Rm}	β_R	β	γ_{M2}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Próba statystyczna wytrzymałości blach wyprodukowanych w latach 1963-1968										
St3S	304	0,081	2,80	3,50	1,03	447	0,066	2,53	3,16	1,04
St3SX/Y	294	0,100	2,69	3,36	1,05	447				
18G2	392	0,075	1,33	1,67	1,17	554	0,058	1,38	1,73	1,12
18G2A	384	0,071	1,87	2,34	1,11	554				
18G2ACu	372	0,066	2,38	2,64	1,06	554				
Próba statystyczna wytrzymałości blach i kształtowników wyprodukowanych w latach 1976-1980										
Znak stali	Granica plastyczności blach R_e , MPa					Granica plastyczności kształtowników R_e , MPa				
	\bar{R}_e	v_{Re}	β_R	β	γ_{M0}	\bar{R}_e	v_{Re}	β_R	β	γ_{M0}
St0	291	0,113	2,89	3,61	1,026	280	0,113	2,65	3,32	1,065
St3SX/Y	299	0,077	2,78	3,48	1,026	287	0,077	2,35	2,94	1,068
	291		2,50	3,12	1,054	281		2,13	2,66	1,093
	280		2,55	3,19	1,051	268		2,08	2,60	1,098
St3S	308	0,068	3,48	4,36	1,000	296	0,068	3,03	3,79	1,000
	300		3,19	3,98	1,000	290		2,79	3,49	1,022
	288		3,22	4,02	1,000	276		2,72	3,40	1,027
St4 St4S	329	0,083	2,71	3,38	1,037	316	0,083	2,33	2,91	1,081
	320		2,45	3,06	1,067	309		2,11	2,63	1,104
	308		2,46	3,08	1,065	295		2,04	2,55	1,109
18G2 18G2A	409	0,077	1,78	2,22	1,128	406	0,077	1,70	2,12	1,135
	402		1,58	1,98	1,146	400		1,53	1,91	1,154
	391		1,93	2,41	1,114	386		1,78	2,23	1,125

to specyfikacje bezpieczne dla praktycznie wszystkich obiektów liniowych i kubaturowych (także zbiorników). Współczynniki częściowe γ_F do oddziaływań na zbiorniki zostały jednak dodatkowo wyspecyfikowane w PN-EN 1993-4-2 (por. tabl. II) jako alternatywa względem rekomendacji zamieszczonej w eurokodzie PN-EN 1990.

Współczynniki nośności γ_{Mi} zostały wyspecyfikowane w [1] (rekomendacja CEN – Comité Européen de Normalisation) i przyjmują następujące wartości:

- $\gamma_{M0} = 1,00$ – nośność przekroju ścianki ze względu na uplastycznienie,
- $\gamma_{M1} = 1,10$ – nośność ścianki na wyboczenie,
- $\gamma_{M2} = 1,25$ – nośność przekroju ścianki na rozerwanie,
- $\gamma_{M4} = 1,00$ – nośność ścianki ze względu na nieprzystosowanie plastyczne,
- $\gamma_{M5} = 1,25$ – nośność połączeń, złączy spawanych lub śrubowych,
- $\gamma_{M6} = 1,10$ – nośność ścianki na zmęczenie.

Współczynniki częściowe γ_{Mi} mogą (i powinny) być określone w Załączniku krajowym. Wymaga to jednak dostępu do wiarygodnych danych statystycznych, co najmniej w zakresie niejednorodności wytrzymałości krajowych wyrobów hutniczych (współczynniki γ_{M0} , γ_{M2} , γ_{M4} i γ_{M6}) oraz wytrzymałości złączy spawanych realizowanych w krajowych wytwórniach konstrukcji stalowych (współczynnik γ_{M5}). Przykład weryfikacji współczynników γ_{M0} i γ_{M2} przedstawiono w tablicy III, wykorzystując wyniki badań statystycznych wytrzymałości stali konstrukcyjnej z lat 1963-1968

opisane w [9] oraz późniejszych badań statystycznych z lat 1976-1978 opisanych w [10]. W tablicy III przytoczono wg [8] obliczone w badaniach własnych miary niezawodności: współczynniki częściowe γ_{M0} i γ_{M2} (por. kolumny (6) i (11)) oraz częściowe wskaźniki niezawodności β_R (por. kolumny (4) i (9), a także w kolumnach (5) i (10) odpowiadające im wskaźniki niezawodności „globalne” β (w kolumnach (4) i (9) zgodnie z zapisem w PN-EN 1990 przyjęto: $\beta_R = 0,8 \beta$).

Zestawione w kolumnie (5) wartości wskaźnika niezawodności $\beta \geq 3,8$ spełniają wymagania klasy niezawodności RC2 (por. tabl. B2 z PN-EN 1990) tylko dla blach dowolnej grubości wyprodukowanych w latach 1970. ze stali St3S. Wyroby hutnicze, wykonane ze stali niskostopowych nie spełniają nawet wymagań najniższej klasy niezawodności RC1 ($\beta \geq 3,3$). Taki sam wniosek wynika z porównania wartości współczynnika nośności przekroju γ_{M0} . Pozytywnie natomiast wypadła weryfikacja współczynnika nośności na rozerwanie blach γ_{M2} .

Zbiorniki stalowe należy projektować, różnicując wymagania niezawodności. Najprostszym sposobem różnicowania niezawodności polega na redukcji współczynników obciążenia γ_F współczynnikami redukcyjnymi K_{Fi} . Są to mnożniki wyspecyfikowane w tablicy B3 zamieszczonej w normie PN-EN 1990 [4] i przytoczone w tablicy IV. Analogiczne współczynniki korekcyjne K_{Ri} mogą być użyte do redukcji współczynników częściowych nośności przekrojów i prętów γ_{Mi} . W aktualnej edycji eurokodów współczynniki K_{Ri} nie zostały wyspecyfikowane. Przyjmując dla klasy niezawodności RC1 wartość

Tablica IV. Wartości współczynników K_{Fi} do oddziaływań wg [7] oraz wartości współczynników K_{Ri} do nośności wg badań własnych
Table IV. KFi factor values to interactions acc. to [7] and K_{Ri} factor values to loads acc. to own tests

Współczynnik redukcji		Klasa niezawodności zbiornika		
		RC1	RC2	RC3
K_{Fi}		0,90	1,00	1,10
K_{Ri}	v_R	RC1	RC2	RC3
	0,05	0,98	1,00	1,02
	0,06	0,97	1,00	1,03
	0,07	0,97	1,00	1,04
	0,08	0,96	1,00	1,04
	0,09	0,95	1,00	1,05
	0,10	0,95	1,00	1,06

wskaznika niezawodności częściowego wg normy PN-EN 1990: $\beta_R = 0,8 \times 3,3 = 2,64$ oraz dla klasy niezawodności RC3 wartość $\beta_R = 0,8 \times 4,3 = 3,44$ – w tablicy IV zestawiono przykładowe wartości współczynników korekcyjnych K_{Ri} obliczone ze wzoru:

$$K_{Ri} = \frac{1 - 3,04v_R}{1 - \beta_R v_R} \quad (6)$$

dla różnych wartości współczynników zmienności granicy plastyczności v_R krajowych stali konstrukcyjnych, otrzymanych w badaniach statystycznych (por. np. tabl. III).

Podstawy obliczeń i wymiarowania

Powłoki zbiorników modeluje się zgodnie z wymaganiami sformułowanymi w eurokodzie PN-EN 1993-1-6:2007 [11], które są spełnione, jeśli w modelu numerycznym powłoki uwzględną się wszystkie elementy usztywniające, otwory oraz przyłącza. Ponadto rozwiązania konstrukcyjne zbiornika powinny odzwierciedlać przyjęte w analizie statycznej warunki brzegowe. Metody analizy statycznej są powiązane z klasą konsekwencji zbiornika. W szczególności w przypadku zbiorników klasy konsekwencji CC3 siły przekrojowe wyznacza się uznanymi metodami komputerowymi, np. metodą elementów skończonych.

Zbiorniki klasy konsekwencji CC2, które charakteryzują się osiową symetrią oddziaływań i podparcia, można obliczać albo wykorzystując analizę numeryczną MES, albo alternatywnie stosując teorię błonową do wyznaczenia naprężeń podstawowych oraz teorię zgięciową powłok sprężystych do opisu lokalnych efektów zginania. Gdy obciążenie zbiornika nie jest osiowo symetryczne, to obliczenia prowadzi się metodą numeryczną.

W przypadku zbiorników klasy konsekwencji CC1 do wyznaczenia naprężeń podstawowych można stosować teorię błonową oraz współczynniki i formuły uproszczone uwzględniające efekty lokalnego zginania i oddziaływania niesymetryczne.

Metody analizy statycznej powłok stalowych zbiorników zalecane do obliczeń wg eurokodu PN-EN 1993-1-6:2007 [11] przytoczono w tablicy V.

Najprostsza analiza statyczna powłoki wg teorii membranowej M prowadzi do następującego rozwiązania wyrażonego w naprężeniach zastępczych:

$$\sigma_{eqEd} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{xEd}^2 + n_{\theta Ed}^2 - n_{xEd} n_{\theta Ed} + 3n_{x\theta Ed}^2} \quad (7)$$

Przyjęte we wzorze (7) oznaczenia sił przekrojowych są zgodne z przyjętymi oznaczeniami osi współrzędnych wg normy [1]. Analiza liniowo sprężysta LA lub sprężysta i geometrycznie nieliniowa GNA prowadzi do następującego wzoru na naprężenia zastępcze:

$$\sigma_{eqEd} = \sqrt{\sigma_{xEd}^2 + \sigma_{\theta Ed}^2 - \sigma_{xEd} \sigma_{\theta Ed} + 3\tau_{x\theta Ed}^2} \quad (8)$$

We wzorze (8) przyjęto oznaczenia:

$$\sigma_{xEd} = \left(\frac{n_{xEd}}{t} \pm \frac{4m_{xEd}}{t^2} \right), \quad \sigma_{\theta Ed} = \left(\frac{n_{\theta Ed}}{t} \pm \frac{4m_{\theta Ed}}{t^2} \right),$$

$$\tau_{x\theta Ed} = \left(\frac{n_{x\theta Ed}}{t} \pm \frac{4m_{x\theta Ed}}{t^2} \right) \quad (9)$$

gdzie: t – grubość powłoki zbiornika, inne symbole wg PN-EN 1993-4-2 [1].

Zaawansowana analiza statyczna geometrycznie i fizycznie nieliniowa powłok idealnych lub z imperfekcjami (por. tabl. V) jest prowadzona metodami numerycznymi. Opis matematyczny tego typu zadań przyjmuje postać równań przyrostowych MES, liniowych względem uogólnionych przemieszczeń. Rozwiązanie tych równań wymaga wykorzystania profesjonalnych programów komputerowych.

Tablica V. Rodzaje analizy statycznej powłok zbiorników stalowych wg [11]

Table V. Types of static analysis of steel tank shells acc. to [11]

Typ analizy	Teoria powłok	Model materiału	Geometria powłoki
Membranowa M	błonowa	nie ma zastosowania	idealna
Liniowo sprężysta LA	liniowa	liniowy	idealna
Liniowo sprężysta bifurkacyjna LBA	liniowa	liniowy	idealna
Sprężysta, geometrycznie nieliniowa GNA	nieliniowa	liniowy	idealna
Fizycznie nieliniowa MNA	liniowa	nieliniowy	idealna
Geometrycznie i fizycznie nieliniowa GMNA	nieliniowa	nieliniowy	idealna
Geometrycznie nieliniowa, sprężysta z imperfekcjami GNIA	nieliniowa	liniowy	z imperfekcjami
Geometrycznie i fizycznie nieliniowa, z imperfekcjami GMNIA	nieliniowa	nieliniowy	z imperfekcjami

Powłokę zbiornika sprawdza się ze względu na stany graniczne z uwzględnieniem: zniszczenia plastycznego (LS1), zmęczenia niskocyklowego – nieprzystosowanie plastyczne (LS2), wyboczenia (LS3), zmęczenia (LS4) i stateczności ogólnej. Podstawowe kryterium nośności w stanie zniszczenia plastycznego materiału rodzimego powłoki (LS1) ma postać:

$$\sigma_{eqEd} \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (10)$$

gdzie f_{yk} – wytrzymałość charakterystyczna stali użytej na powłokę.

Jeżeli są spełnione odpowiednie wymagania jakości, to można przyjąć, że efektywność wytrzymałościowa złącza powłoki zbiornika na spoiny czołowe z pełnym przetopem wynosi 100% wyężenia (10). Złącza na spoiny pachwinowe należy sprawdzić metodą kierunkową lub uproszczoną wg normy PN-EN 1993-1-8 [12]. Kryterium nośności spoiny wg drugiej metody ma postać:

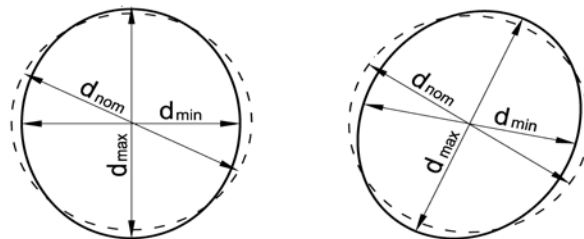
$$F_{wEd} \leq a \frac{f_u}{\sqrt{3\beta_w \gamma_{M5}}} \quad (11)$$

gdzie: F_{wEd} – wartość obliczeniowa siły na jednostkę długości spoiny, a – grubość obliczeniowa spoiny, f_u – wytrzymałość charakterystyczna na rozciąganie stali użytej na powłokę, $\beta_w = 0,8+1,0$ – współczynnik korelacji dla spoin pachwinowych wg normy [12].

Uwzględnianie w sposób jawny imperfekcji geometrycznych w obliczeniach nie jest wymagane, chyba że stosuje się zaawansowaną metodę analizy statycznej GNIA lub GMNIA. Imperfekcje geometryczne podlegają jednak kontroli bez względu na zastosowaną metodę analizy. Szczególne nasilenie imperfekcji geometrycznych obwodowych i południkowych mogą wywoływać złącza spawane.

Nośność na wyboczenie konstrukcji powłokowych jest uzależniona od poziomu imperfekcji geometrycznych, które mogą mieć zróżnicowaną postać. Imperfekcje są związane z odchyłkami kształtu powłoki technicznej od geometrii idealnej, np. dla zamkniętej powłoki walcowej parametrem charakterystycznym jest średnica d , zatem podstawową imperfekcją jest owalizacja przekroju. Imperfekcja taka jest wywołana procesem wytwarzania i montażu konstrukcji, a poziom tolerowanych odchyłek jest kontrolowany. Inny rodzaj imperfekcji to brak współosiowości elementów montażowych, który występuje nie tylko w przypadkach skokowej zmiany grubości blach, ale także przy łączeniu blach o tej samej grubości nominalnej. Zaburzenia kształtu powodują także lokalne wybrzuszenia i załomy blach, zwłaszcza w strefach połączeń spawanych. Dla zamkniętej powłoki cylindrycznej miarą imperfekcji przekroju jest stosunek różnicy średnicy maksymalnej d_{max} i minimalnej d_{min} do średnicy nominalnej d_{nom} :

$$U_r = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{nom}} \quad (12)$$



Rys. 1. Deformacje przekroju zamkniętej powłoki cylindrycznej: symetryczne spłaszczenie lub niesymetryczna owalizacja
Fig. 1. Intersection distortion of closed cylindrical shell with symmetrical or non-symmetrical ovalization

Wzór (12) umożliwia ilościową ocenę deformacji przekroju w postaci symetrycznej lub niesymetrycznej (rys. 1). Dopuszczalne wartości parametru U_r , które definiują trzy klasy imperfekcji powłok stalowych wg zaleceń PN-EN 1993-1-6, zestawiono w tablicy VI.

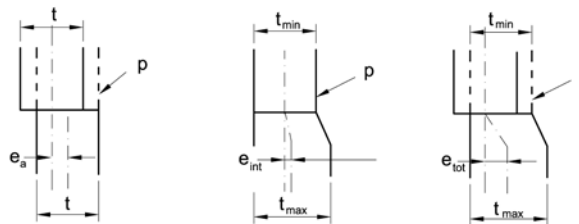
Przykłady braku współosiowości połączeń paneli pokazano na rysunku 2. Miarą imperfekcji dla blach o stałej grubości jest przesunięcie osi e_a , a dla blach o zmiennej grubości – bezwymiarowy parametr U_e , czyli stosunek:

$$U_e = \frac{e_a}{t_{ave}} = \frac{e_{tot} - e_{int}}{0,5(t_{min} + t_{max})} \quad (13)$$

Graniczne wartości parametru U_e oraz mimośrodu e_a dla trzech klas imperfekcji powłok stalowych wg zaleceń PN-EN 1993-1-6 zestawiono w tablicy VII.

Tablica VI. Dopuszczalne wartości parametru imperfekcji U_r
Table VI. Allowable values of imperfection parameter U_r

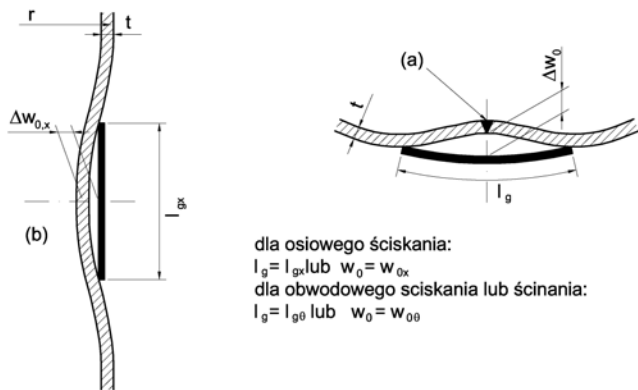
Klasa imperfekcji	Średnica nominalna		
	$d < 0,5 \text{ m}$	$0,5 \text{ m} < d < 1,25 \text{ m}$	$d \geq 1,25 \text{ m}$
C	0,030	$0,015+0,0200(1,25-d)$	0,015
B	0,020	$0,010+0,0133(1,25-d)$	0,010
A	0,014	$0,007+0,0093(1,25-d)$	0,007



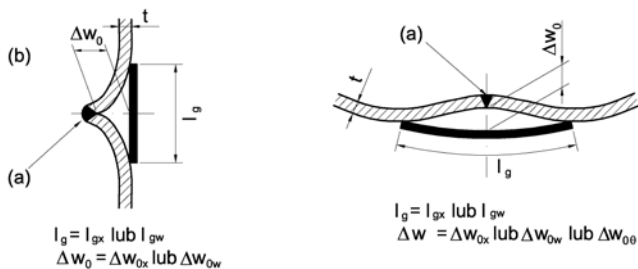
Rys. 2. Brak współosiowości paneli blach
Fig. 2. Lack of coaxiality of plate panels

Tablica VII. Dopuszczalne wartości parametru imperfekcji U_e i mimośrodu e_a
Table VII. Allowable values of imperfection U_e and eccentric e_a parameter

Klasa imperfekcji	Max U_e	Max e_a , mm
C	0,30	4
B	0,20	3
A	0,14	2



Rys. 3. Pomiary strzałki wybrzuszeń powłoki walcowej wzdłuż tworzącej i po obwodzie
Fig. 3. Deflection measurements of cylindrical shell along generating line and circumference



Rys. 4. Pomiary deformacji spawalniczych powłok
Fig. 4. Measurement of welded shells deformation

Tablica VIII. Długość bazy pomiarowej wg PN-EN 1993-1-6
Table VIII. Reference line length acc. to PN-EN 1993-1-6

Obciążenie powłoki	Kierunek pomiaru	Długość bazy pomiarowej
Osiowe ściskanie	południkowy lub obwodowy przez spoinę	$l_{gx} = 4 \sqrt{rt}$
Obwodowe ściskanie lub ścinanie	obwodowy	$l_{g0} = 2,3 \sqrt[4]{l^2 rt}$ l – długość powłoki
Dowolne ściskanie	przez spoinę oba kierunki południkowy i obwodowy	$l_{gw} = 25t$ lub $l_{gw} = 25t_{min}$ oraz $l_{gw} \leq 500$ mm t_{min} – mniejsza z grubości spawanych blach

Wybrzuszenia wykonawcze powłok walcowych pokazano na rysunkach 3 i 4. Miarą deformacji powłoki jest strzałka wybrzuszenia Δw_0 , jaką można zmierzyć na bazie liniowej lub łukowej l_g . Zalecane wymiary bazy pomiarowej wg PN-EN 1993-1-6 zestawiono w tabeli VIII. Bezwymiarowy parametr imperfekcji powierzchniowej ma postać:

$$U_{oi} = \frac{\Delta w_i}{l_{agi}} \quad i = x, \theta, w. \quad (14)$$

Dopuszczalne wartości parametru imperfekcji $max U_o$ dla poszczególnych klas imperfekcji powłok wg normy PN-EN 1993-1-6 wynoszą:

- dla klasy C $max U_o = 0,016$
- dla klasy B $max U_o = 0,010$
- dla klasy A $max U_o = 0,006$

Przykład obliczeń zbiornika stokażowego

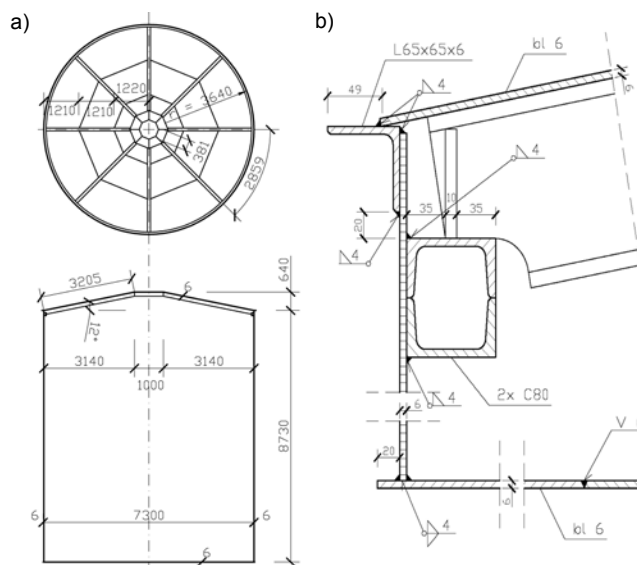
Sprawdzić warunki nośności powłoki stalowego naziemnego zbiornika walcowego o osi pionowej, z dachem stożkowym stałym, dla następujących danych i warunków:

- Przeznaczenie – zbiornik wody amoniakalnej: $q = 898 \text{ kg/m}^3$ (klasa konsekwencji CC3).
- Temperatura obliczeniowa płaszczka $t = 100^\circ\text{C}$.
- Naciski w przestrzeni powietrznej $p_n = 5,0 \text{ kPa}$ lub podciśnienie $p_p = -0,5 \text{ kPa}$.
- Gatunek stali 1.4301 (X5CrNi18-10) (naddatek grubości blach na korozję 0,5 mm).
- Ocieplenie pobocznic i dachu – wełna mineralna 8 cm + bl. Al 1 mm.
- Obciążenia użytkowe pomostu technologicznego $q = 1,5 \text{ kN/m}^2$.
- Lokalizacja – Puławy.

Schemat zbiornika i jego podstawowe wymiary pokazano na rysunku 5a, a szczegóły konstrukcji połączenia pobocznic z dnem i dachem na rysunku 5b. Połączenia spawane spoinami warsztatowymi i montażowymi należy wykonać, uwzględniając klasę wykonania konstrukcji EXC 3 wg klasyfikacji normy PN-EN 1090-2 (pełna kontrola jakości złączy spawanych).

Konstrukcję powłokową zbiornika zaprojektowano jednolicie z blach o grubości $t = 6 \text{ mm}$ połączonych spoinami czołowymi (połączenie pobocznic z dachem i dnem jak na rysunku 5b), ze stali 1.4301 (X5CrNi18-10 – stal austenityczna w stanie przesyconym), dla której wytrzymałość charakterystyczna wg PN-EN 10028-7:2004 [2] wynosi:

- w temperaturze 20°C (warunek próby wodnej) $f_{yk} = 210 \text{ MPa}$ i $f_u = 520 \text{ MPa}$,
- w temperaturze eksploatacyjnej 100°C : $f_{yk} = 157 \text{ MPa}$ i $f_u = 460 \text{ MPa}$.



Rys. 5. Zbiornik na wodę amoniakalną: a) schemat zbiornika, b) szczegóły konstrukcji

Fig. 5. Ammonia water steel tank: a) the scheme of tank, b) details of structure

Przyjęto następujące wartości współczynników częściowych:

- dla oddziaływań: $\gamma_F = 1,40$ dla parcia wody amoniakalnej, $\gamma_F = 1,50$ dla pozostałych obciążeń zmiennych oraz $\gamma_F = 1,35$ (1,00) dla obciążeń stałych,
- współczynniki nośności $\gamma_{M0} = 1,10$ (uwzględniono pośrednio wyniki weryfikacji statystycznej wg tabl. III oraz $\gamma_{M2} = \gamma_{M5} = 1,25$).

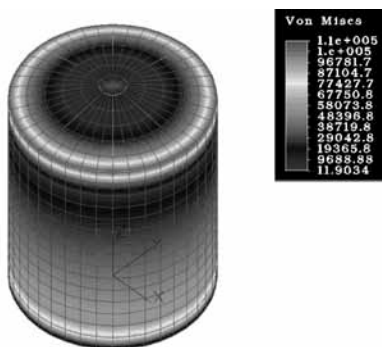
Uwzględniając klasę konsekwencji CC3, której odpowiada klasa niezawodności RC3, przyjęto współczynniki redukcyjne wg tablicy IV: dla obciążeń $K_{Fi} = 1,1$ oraz dla nośności plastycznej blach $K_R = 1,05$.

Uwzględniając powyższe warunki wyjściowe i założenia opracowano model komputerowy zbiornika, z uwzględnieniem szczegółów konstrukcyjnych pokazanych na rysunku 5b. Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych, wymiarujące blachę powłoki zbiornika (dla schematu obciążeń: nadciśnienie + działanie wiatru + parcie wody amoniakalnej + minimalny ciężar własny) pokazano na rysunku 6 – pobocznica i dach oraz na rysunku 7 – dno zbiornika. Z wyskalowanej na

rysunku 6 mapy naprężeń zastępczych wynika miarodajne kryterium niezawodności powłoki zbiornika:

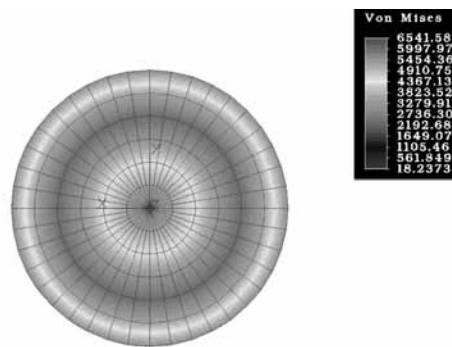
$$K_{Fi}\sigma_{eqEd} \quad 1,1 \cdot 113,7 = 125 \text{ MPa} \leq \frac{f_{yk}}{K_R \gamma_{M0}} = \frac{157}{1,05 \cdot 1,1} = 136 \text{ MPa.} \quad (15)$$

W warunku (15) mnożnik K_{Fi} należy stosować tylko do obciążeń zmiennych, jednak wpływ obciążeń stałych na wyężenia powłoki zbiornika jest znikomy, dlatego dla ujawnienia pozycji elementów niezawodności konstrukcji powłoki zastosowano zapis jak wyżej. Inne warunki stanu granicznego nośności powłoki albo nie są miarodajne (LS2 i LS4), albo są konstrukcyjnie spełnione (LS3 – zgodnie z kryterium z PN-EN 1993-4-2 dla zachowania stateczności nie potrzeba pierścienia pośredniego usztywniającego pobocznice zbiornika).



Rys. 6. Mapa naprężeń zastępczych $\bar{\sigma}_{eqEd}$ pobocznicy i dachu zbiornika, kPa

Fig. 6. Substitute stress distribution $\bar{\sigma}_{eqEd}$ in side surface and tank roof, kPa



Rys. 7. Mapa naprężeń zastępczych $\bar{\sigma}_{eqEd}$ dna zbiornika, kPa

Fig. 7. Substitute stress distribution $\bar{\sigma}_{eqEd}$ in tank bottom, kPa

Podsumowanie

System współczynników częściowych wprowadzony do metody stanów granicznych wg eurokodu EN 1990 to nowy problem badawczy, ponieważ dotyczy dotąd niestosowanej formacji wymiarowania konstrukcji budowlanych w Polsce. Współczynniki nośności γ_M , stosowane do oceny niezawodności zbiorników stalowych na ciecze i gazy płynne, zostały podane w eurokodzie EN 1993-4-2, z zastrzeżeniem o możliwej odmiennej specyfikacji regionalnej. Załącznik krajowy do eurokodu PN-EN 1993-4-2 takiej specyfikacji nie podaje, zalecając jednocześnie – bez weryfikacji statystycznej wytrzymałości wyrobów hutniczych produkowanych w Polsce (współczynniki γ_{M0} , γ_{M2} , γ_{M5}) specyfikacje z normy EN 1993-4-2. Przeprowadzona kontrolna weryfikacja współczynników: nośności plastycznej blach (współczynnik γ_{M0}), nośności blach stalowych na rozerwanie (współczynnik γ_{M2}) oraz nośności złączy spawanych (współczynnik γ_{M5}) wykazała, że specyfikacje europejskie w odniesieniu

do jakości wyrobów krajowych na ogół nie są uzasadnione. Do weryfikacji wykorzystano reprezentatywną próbę statystyczną wytrzymałości blach zestawioną w latach 1963-1968 przez Z. Menderę [9]. W szczególności wg tych danych, empiryczna obliczeniowa granica plastyczności badanych blach jest mniejsza od wartości nominalnej, co oznacza, że wartości współczynnika nośności plastycznej $\gamma_{M0} > 1,0$ (tabl. III). Weryfikacja statystyczna dała pozytywny wynik w przypadku wytrzymałości blach na rozciąganie, która charakteryzuje nośność złączy spawanych (współczynnik $\gamma_{M2} = \gamma_{M5}$).

Z uwagi na zmiany systemowe, jakie zaszły w Polsce w latach 1990., w świetle otrzymanych w pracy rezultatów, konieczne jest ponowne zestawienie próby statystycznej wytrzymałości współcześnie produkowanych krajowych wyrobów hutniczych i weryfikacja statystyczna współczynników materiałowych.

Literatura

- [1] PN-EN 1993-4-2:2009. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 4-2: Zbiorniki.
- [2] PN-EN 10028-7:2004. Wyroby płaskie ze stali na urządzenia ciśnieniowe. Część 7: Stale odporne na korozję.
- [3] PN-EN 14015:2010. Zarządzanie środowiskowe – ocena środowiskowa miejsc i organizacji (EASO).
- [4] PN-EN 14620:2010. Projektowanie i budowa na miejscu użytkowania pionowych, walcowych zbiorników stalowych o płaskim dnie, do magazynowania oziębionych, skroplonych gazów o temperaturach roboczych pomiędzy 0°C i –165°C.
- [5] PN-EN 1090-2:2009. Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych – Część 2: Wymagania techniczne dotyczące wykonania konstrukcji stalowych.
- [6] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 kwietnia 2002 w/s warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów trujących lub żrących. Dz.U. nr 63, poz. 572.
- [7] PN-EN 1990:2004. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [8] Gwóźdź M., Machowski A.: Wybrane badania i obliczenia konstrukcji budowlanych metodami probabilistycznymi. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2011 (w druku).
- [9] Mendera Z.: Zagadnienia stanów granicznych konstrukcji stalowych. Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Budownictwo Lądowe z. 33, Zeszyt Naukowy 7, Kraków 1967.
- [10] Murzewski J.: Niezawodność konstrukcji Inżynierskich. Arkady, Warszawa 1989.
- [11] PN-EN 1993-1-6:2007. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych.
- [12] PN-EN 1993-1-8: 2005. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów.

Wydarzenia



Nowy standard z rodziną urządzeń Kempact RA

Fiński producent urządzeń spawalniczych Kemppe Oy wprowadził na rynek nową linię kompaktowych urządzeń MIG/MAG, ustanawiając tym samym nowe standardy we wzornictwie przemysłowym i charakterystyce produktu.

Urządzenia z rodziny Kempact RA powstały z myślą o potrzebach nowoczesnych warsztatów spawalniczych. Charakteryzują się unikalnym, eleganckim, a zarazem praktycznym wzornictwem. Zostały skonstruowane z wykorzystaniem nowoczesnych rozwiązań i z myślą o spełnianiu potrzeb klienta, a wszystko po to, żeby spawanie było wydajne, precyzyjne i efektywne. Ich konstrukcja powstała na bazie najnowszych rozwiązań Kemppe w zakresie budowy źródeł spawalniczych, dzięki czemu oferują wysoką jakość spawania i maksymalne wykorzystanie energii. Do wyboru jest 11 modeli o maksymalnym prądzie spawania 180, 250 i 320 A. Istnieje również możliwość wyboru pomiędzy wersją sterowaną ręcznie (R) i adaptacyjnie (A). Dzięki różnorodnym modelom maszyna ta zaspokaja szeroki wachlarz potrzeb zakładów zajmujących się obróbką metali. W zestawie znajduje się uchwyt spawalniczy i kabel masy.

Dzięki zaawansowanej technologii udało się zredukować koszty energii o 10% w porównaniu do konwencjonalnych, skokowo regulowanych źródeł spawalniczych. Maszyna ma też wiele innowacyjnych rozwiązań: oświetlenie komory szpuli Brights™, ułatwiające wymianę drutu w miejscach słabo oświetlonych, wskaźnik serwisu WireLine™ sygnalizujący potrzebę przeglądu układu podającego drut oraz zintegrowane podwozie GasMate™, ułatwiające montaż butli z gazem i przemieszczanie maszyny przy jednocześnie zwiększonym bezpieczeństwie personelu. Niezależnie od wybranego modelu, urządzenie Kempact RA zapewnia wykonanie każdego zadania spawalniczego z najwyższą jakością. Urządzenie Kempact RA powstało z myślą o przyszłym użytkowniku. Wszystko, od czytelnego i łatwego w obsłudze panelu sterowania LCD, umieszczonego na optymalnej wysokości, poprzez innowacyjną konstrukcję podwozia, wbudowane szufladki na części zapasowe i oświetlenie komory szpuli za pomocą diod LED, sprawia, że praca z maszyną Kempact RA to przyjemność. Modele ze sterowaniem ręcznym (oznaczenie R) umożliwiają ręczną regulację napięcia i prędkości podawania drutu. Są wyposażone w bogatą gamę funkcji standardowych, w tym wybór



rodzaju gazu, przełącznik 2T/4T, funkcję SPOT/CYCLE ARC i HOT SPOT, specjalistyczną funkcję punktowego podgrzewania blachy przeznaczoną dla profesjonalnych blacharzy i warsztatów samochodowych. Modele sterowane adaptacyjnie (oznaczenie A) mają wszystkie funkcje standardowe, a także kanały pamięci i tryb adaptacyjnej regulacji parametrów spawania, w którym moc spawania automatycznie dopasowuje się do zadanej grubości spawanego materiału.

Doceniana za innowacyjną i praktyczną konstrukcją rodzina urządzeń Kempact RA została niedawno nagrodzona uznana, międzynarodową nagrodą iF 2012 w kategorii wzornictwa przemysłowego. Organizowany w Niemczech konkurs iF jest jednym z najstarszych i najbardziej znanych na świecie. Konkurs jest organizowany przez iF Forum Design e.V., które każdego roku powołuje międzynarodowe jury złożone z ekspertów w dziedzinie wzornictwa, które testuje i ocenia zgłoszone produkty. Nagroda iF od ponad 60 lat jest uznawana na całym świecie za dowód doskonałego wzornictwa.