

Wpływ zależności kształtowo-wymiarowych i ciśnienia roboczego na grubość ścianki zbiorników ciśnieniowych projektowanych według WUDT/UC/2003

Influence of geometrically-dimensional dependence and working pressure on pressure vessel wall thickness according to WUDT/UC/2003

Streszczenie

W pracy dokonano analizy zmian grubości materiałów stosowanych do wytwarzania zbiorników ciśnieniowych w zależności od ich kształtu i wymiarów oraz ciśnienia roboczego. Obliczeń dokonano na podstawie formuły przygotowanej na bazie wytycznych WUDT/UC/2003. Zaprezentowano wpływ długości, średnicy, ciśnienia oraz zmiany wymiarów zbiornika na grubość ścianki. Porównano różne rozwiązania konstrukcyjne dennic oraz określono wpływ geometrii dna wypukłego na grubość jego ścianki. Podano wytyczne kontroli stateczności projektowanego zbiornika poziomego.

Słowa kluczowe: zbiorniki ciśnieniowe, projektowanie konstrukcji, konstrukcje spawane

Abstract

In this paper analysis of changes in thickness of materials used in manufacture of pressure vessels based on their shape, size and applied pressure are made. Calculations were made on the basis of prepared analytical formula according to guidelines WUDT/UC/2003. Influence of length, diameter, pressure and changes in dimensions of wall thickness of tank are presented. Different heads designs are compared and influence of dished head geometry on wall thickness are determined. Guidance of stability control of designed horizontal pressure vessel are provided.

Keywords: pressure vessels, design, welded structures

Wprowadzenie – warunki UDT

Zgodnie z definicją dyrektyw Unii Europejskiej urządzenia ciśnieniowe to zbiorniki, rurociągi, osprzęt zabezpieczający oraz osprzęt ciśnieniowy, zawierające gaz lub ciecz, w których najwyższe ciśnienie dopuszczalne jest większe od 0,05 MPa (0,5 bara) [1÷3]. Zbiorniki ciśnieniowe, najczęściej wykonywane jako konstrukcje spawane, niezależnie od rodzaju i przeznaczenia, objęte są nadzorem odpowiednich instytucji państwowych (w Polsce Urzędu Dozoru Technicznego) lub branżowych [4÷8]. UDT opracował *Warunki Urzędu Dozoru Technicznego dla Urządzeń Ciśnieniowych* (WUDT-UC), które mogą być bezpośrednio wykorzystywane przy projektowaniu i wytwarzaniu urządzeń ciśnieniowych na podstawie ustawy o dozorcze technicznym. Mimo, iż są one nieobowiązkową specyfikacją techniczną (nie mają mocy przepisów prawnych), opartą na zasadzie dobrej praktyki inżynierskiej, mogą stanowić przydatne źródło informacji przy projektowaniu, wytwarzaniu, badaniach, eksploatacji, naprawach i modernizacji urządzeń ciśnieniowych. Ich zastosowanie

jest uznawane za spełnienie zasadniczych wymagań dyrektyw europejskich przez UDT, działającego jako jednostka notyfikowana na podstawie ustawy o systemie oceny zgodności [4,5]. Do urządzeń ciśnieniowych mają zastosowanie odpowiednio wymagania podane w części „Wymagania ogólne” w rozdziałach: WUDT-UC-WO-T „Wymagania ogólne. Wprowadzenie, określenia i ustalenia”, WUDT-UC-WO-M „Wymagania ogólne. Materiały”, WUDT-UC-WO-O „Wymagania ogólne. Obliczenia wytrzymałościowe”, WUDT-UC-WO-W „Wymagania ogólne. Wytwarzanie” [4,5].

Formuła obliczeniowa i założenia wstępne

W celu efektywnego przeprowadzenia analizy wpływu cech geometrycznych oraz parametrów pracy zbiornika walcowego na grubość jego ścianki sporządzono dedykowaną formułę obliczeniową. Równania i tabele użyte w formule obliczeniowej bazują na wytycznych WUDT-UC-2003.

Pozwala ona na podstawie danych wejściowych na przeprowadzenie obliczeń wytrzymałościowych walcowego płaszcza oraz różnych rozwiązań konstrukcyjnych dennic zbiornika. Uwzględnia występowanie króćców i włączów rewizyjnych oraz umożliwia sprawdzenie stateczności zbiornika pracującego w pozycji poziomej. Przygotowany arkusz kalkulacyjny uwzględnia także współczynnik osłabienia złączami spawanymi oraz współczynniki bezpieczeństwa dla różnych materiałów. Formuła składa się z wprowadzenia i 14 aktywnych arkuszy kalkulacyjnych, z których użytkownik wybiera interesujące go moduły, obejmujące swoim zakresem wytyczne niezbędne do przeprowadzenia obliczeń projektowanego urządzenia ciśnieniowego. Na rysunku 1 pokazano fragment przygotowanej formuły obliczeniowej. Poszczególne jej komórki powiązane są zależnościami arytmetycznymi.

OBLICZENIA CZĘŚCI WALCOWEJ ZBIORNIKA					
WYPEŁNIAMY TYLKO ZIELONE POLA!					
temperatura pracy (t)		°C			
objętość całkowita zbiornika (V)	0,0	m ³	0	1	
maksymalne ciśnienie dopuszczalne (p)	0	bar		MPa	
średnica wewnętrzna zbiornika (D _w)		mm	0	m	
średnica włączu rewizyjnego (d _z)		mm	0	m	
długość zbiornika		mm	0	m	
materiał:					
granica plastyczności lub pełzania		MPa			
współczynnik bezpieczeństwa X (jego wartość przyjmuje się z tabeli dla określonego rodzaju materiału)					
naprężenia dopuszczalne k	#DZIEL/0!	MPa			
Wartości współczynnika bezpieczeństwa dla granicy plastyczności					
X		Materiał			
1,65		stal węglowa, dla której ustalono warunki co do udarności, dla stali stopowych i stalowych rur kotlewych			
1,8		dla pozostałych stali węglowych			
2,31		dla elementów ze staliwa, dla którego ustalono warunki co do udarności			
2,52		dla elementów ze staliwa, dla którego nie ustalono warunków co do udarności			
7		dla elementów walcowych żeliwnych			
4		dla elementów zbrązu, mosiądzu, wyżarzonej miedzi i			
Wartości współczynnika bezpieczeństwa dla granicy pełzania					
1,65		dla elementów walcowych, kołnierzy i śrub w połączeniach			
1,5		dla pozostałych elementów			
1		wartość przyjmowana dla R _{1(t)} /t			

Rys. 1. Fragment przygotowanej formuły obliczeniowej do projektowania urządzeń ciśnieniowych

Fig. 1. Part of prepared analytical formula for pressure vessel design

Materiał wybrany do obliczeń to stal S355JR, często stosowana do wytwarzania urządzeń ciśnieniowych. Należy podkreślić, że ewentualna zmiana gatunku stali związana ze zmianą właściwości mechanicznych (granicy plastyczności) ma wpływ na grubość ścianki zbiornika. Temperatura obliczeniowa we wszystkich przypadkach wynosiła 20°C. W celu eliminacji dodatkowych parametrów zmiennych zbiornik zaprojektowano bez otworów. Mając na uwadze uproszczenie obliczeń w przeprowadzonych analizach przyjęto współczynnik osłabienia spoinami z=1.

Wpływ długości i średnicy zbiornika na obliczeniową grubość ścianki

W zależności od tego czy grubość ścianki walcowego elementu ciśnieniowego oblicza się na podstawie wzoru bazującego na średnicy wewnętrznej zbiornika, czy średnicy zewnętrznej przyjmuje on postać:

$$g_0 = \frac{p_o \cdot D_w}{\frac{2,3}{\alpha} \cdot k \cdot z - p_o} \quad \text{lub} \quad g_0 = \frac{p_o \cdot D_z}{\frac{2,3}{\alpha} \cdot k \cdot z + p_o}$$

gdzie:

p_o – ciśnienie obliczeniowe, MPa
 k – naprężenia dopuszczalne, MPa

D_w – średnica wewnętrzna walca, mm

z – współczynnik wytrzymałościowy definiujący osłabienia otworami

α – współczynnik zależny od średnicy zewnętrznej i zakładanej grubości ścianki

Już na początku analizy, podczas określania wartości współczynnika α , dochodzi do pewnego rodzaju niekonsekwencji, ponieważ do jego wyznaczenia potrzebna jest grubość ścianki g_o , która faktycznie jest przedmiotem obliczeń. W związku z tym na początku projektowania konstruktor musi założyć grubość ścianki, na podstawie której weryfikuje końcowy wynik. Optymalizacja musi być prowadzona aż do momentu, kiedy uzyskane zostaną najbardziej zbliżone wartości obliczeniowej i założonej grubości ścianki. Należy pamiętać o tym, aby grubość założona była większa od oszacowanej i nie była mniejsza niż 2 mm (wyjątek – zbiorniki o średnicy mniejszej niż 100 mm) [4].

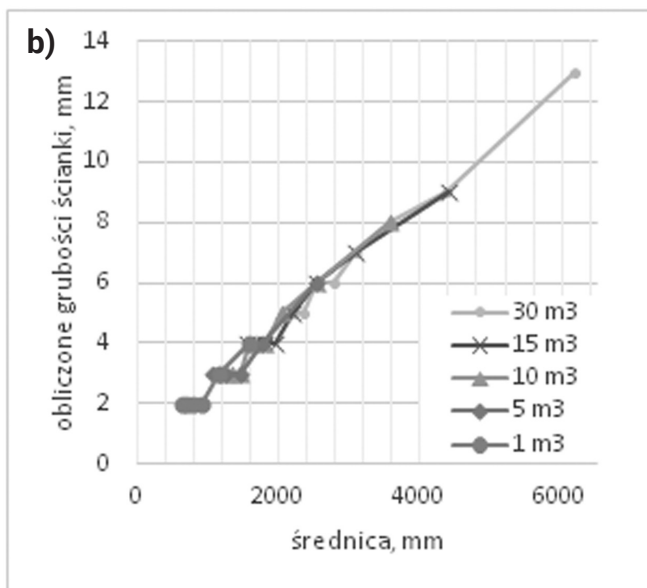
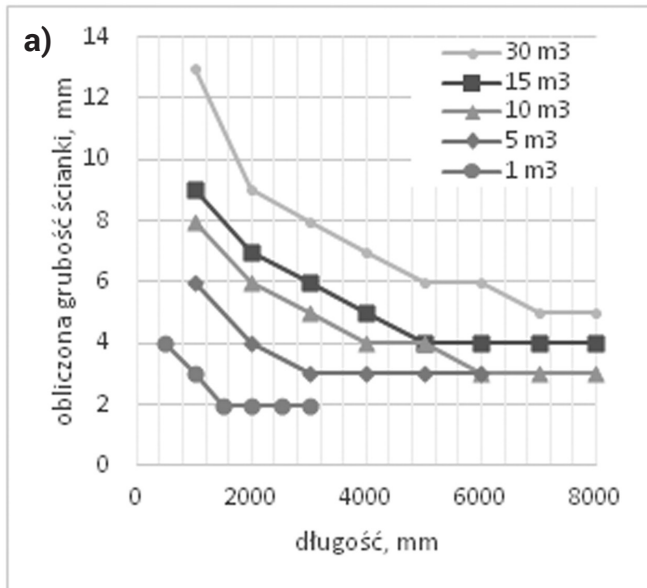
W celu sprawdzenia wpływu wymiarów części walcowej zbiornika na grubość jego ścianki, wykonano obliczenia dla pięciu wybranych zbiorników poziomych o różnym stosunku średnicy do długości (o różnych objętościach). Przyjęte objętości zostały podane w tabelicy I, w której określono również różne długości zbiorników, mieszczące się w zakresie od 500 do 8000 mm. Średnica urządzenia była we wszystkich przypadkach wypadkową dwóch wcześniej podanych parametrów. Ciśnienie obliczeniowe miało zawsze tę samą wartość i wynosiło 1 MPa.

Tablica I. Zależność obliczeniowej grubości ścianki zbiornika o pojemności 1÷30 m³ w funkcji założonej długości i średnicy

Table I. Dependence of computed wall thickness of 1÷30 m³ capacity vessel as a function of predetermined length and diameter

Średnica mm	Długość mm	Grubość ścianki mm	Średnica mm	Długość mm	Grubość ścianki mm
pojemność ~1 m ³			pojemność ~10 m ³		
1600	500	4	1350	7000	3
1150	1000	3	1250	8000	3
900	1500	2	pojemność ~15 m ³		
800	2000	2	4390	1000	9
700	2500	2	3090	2000	7
650	3000	2	2520	3000	6
pojemność ~5 m ³			2200	4000	5
2530	1000	6	1950	5000	4
1780	2000	4	1800	6000	4
1450	3000	3	1650	7000	4
1260	4000	3	1550	8000	4
1150	5000	3	pojemność ~30 m ³		
1050	6000	3	6180	1000	13
pojemność ~10 m ³			4370	2000	9
3570	1000	8	3570	3000	8
2530	2000	6	3100	4000	7
2060	3000	5	2770	5000	6
1800	4000	4	2550	6000	6
1600	5000	4	2350	7000	5
1460	6000	3	2200	8000	5

Obliczeniowa grubość ścianki dla danej objętości zbiornika każdorazowo maleje wraz ze wzrostem jego długości (rys. 2a). Szczególnie jest to zauważalne dla dużych pojemności, gdzie niewielka redukcja długości zbiornika skutkuje znacznym zwiększeniem wymaganej grubości ścianki. Jest to oczywiście ściśle związane ze zmianą wymiaru średnicy zbiornika. Bazując na wykresie przedstawionym na rysunku 2b, można stwierdzić, że wpływ średnicy na grubość ścianki jest liniowy dla przyjętych objętości zbiornika. Grubość ścianki zbiorników o tej samej lub bardzo zbliżonej średnicy, lecz przy innych wartościach objętości i długości jest taka sama, co świadczy o tym, że średnica wewnętrzna jest jednym z podstawowych parametrów wpływających na projektowaną grubość zbiornika.



Rys. 2. Zależność obliczeniowej grubości ścianki od długości zbiornika (a) i jego średnicy (b) dla wybranych pojemności w zakresie 1÷30 m³
Fig. 2. Dependence of computed wall thickness on a tank length (a) and its diameter (b) for selected volume values in the range of 1÷30 m³

Na podstawie analizy tabelicy I można zaryzykować tezę, że wymiar długości zbiornika w niewielkim stopniu rzutuje na obliczeniową grubość ścianki. W celu oceny rzeczywistego wpływu długości zbiornika na ewentualną zmianę grubości ścianki przeprowadzono dodatkowe obliczenia dla trzech wymiarów średnic 1000, 2000 i 3000 mm, natomiast znacząco innych długości projektowanej konstrukcji

(równowartość 1x, 2x, i 3x średnicy – tabl. II). Bezspornie wyniki analizy potwierdziły konieczność korekty projektowanej grubości ścianki zbiornika w funkcji zmiany jego wymiarów, ale rzeczywistym parametrem mającym realny wpływ na konieczność zmiany jej wartości jest średnica. Oznacza to, że grubość ścianki części walcowej zbiorników ciśnieniowych nie zależy od ich długości. Potwierdza to zestawienie tabelic I i II, gdzie w przypadku zbliżonych średnic i różnych długości grubość ścianki płaszczka nie zmienia się.

Tabela II. Wpływ zmiany wymiarów zbiornika na grubość jego ścianki

Table II. Influence of changes in tank dimensions on its wall thickness

Średnica mm	Długość mm	Grubość ścianki mm
1000	1000	3
1000	2000	3
1000	3000	3
2000	2000	5
2000	4000	5
2000	6000	5
3000	3000	7
3000	6000	7
3000	9000	7

Wpływ ciśnienia roboczego na obliczeniową grubość ścianki

Przyjmując za stałe długość oraz średnicę zbiornika obliczono jego wymaganą grubość ścianki w zależności od wartości ciśnienia pracy. Do analizy wybrano objętości 1 i 10 m³. Wymiary zbiorników i wartości ciśnień (w zakresie 0,5÷20 MPa) zostały zestawione w tabelicach III i IV. W poprzednich tabelicach (I, II) wyniki zaokrąglano w górę do grubości handlowych. W tym wypadku, chcąc wykazać liniowy wpływ ciśnienia pozostawiono wartości obliczeniowe.

Analiza wykresów dla pojemności 1 i 10 m³ przedstawionych na rysunku 3 wyraźnie wskazuje liniowy wpływ ciśnienia roboczego na grubość ścianki części walcowej zbiornika. Na tej podstawie można wyciągnąć istotny z praktycznego punktu widzenia wniosek, iż zwiększenie ciśnienia roboczego o wartość x, skutkuje koniecznością zaprojektowania grubości ścianki powiększonej proporcjonalnie o wartość x. Kąt nachylenia prostej zależy od wzajemnej korelacji zmiennych: średnica-długość zbiornika, co potwierdza wykazaną na podstawie interpretacji wykresów na rysunku 2 zależność obliczeniowej grubości ścianki od planowanych wymiarów konstrukcji. Obliczenia wykazały niewielkie różnice w grubościach ścianek dla małych pojemności i ciśnień (np. objętość 1 m³, ciśnienie 3 MPa, różnica w funkcji wymiarów zbiornika od 4,27 do 7,01 mm), przy jednoczesnej konieczności stosowania materiałów o większych grubościach, dla rozwiązań o dużych objętościach projektowanych na znaczne napory medium roboczego (gaz, ciecz) na ścianki konstrukcji (np. objętość 10 m³, ciśnienie 20 MPa, różnica w funkcji wymiarów zbiornika od 52,65 do 106,56 mm). Porównując wyniki otrzymane dla obu koncepcji wymiarowych zbiorników można stwierdzić, że objętość zbiornika nie ma znaczącego wpływu na zmiany grubości ścianki wywołane ciśnieniem. Wyniki przedstawione w tabelicach III (średnica/długość: 1150x1000 mm) i IV (średnica/długość:

Tablica III. Wartość obliczeniowej grubości ścianki w funkcji ciśnienia pracy dla trzech wariantów wymiarowych zbiornika o objętości 1 m³
Table III. Value of computed wall thickness as a function of work pressure for three size variants of a 1 m³ volume tank

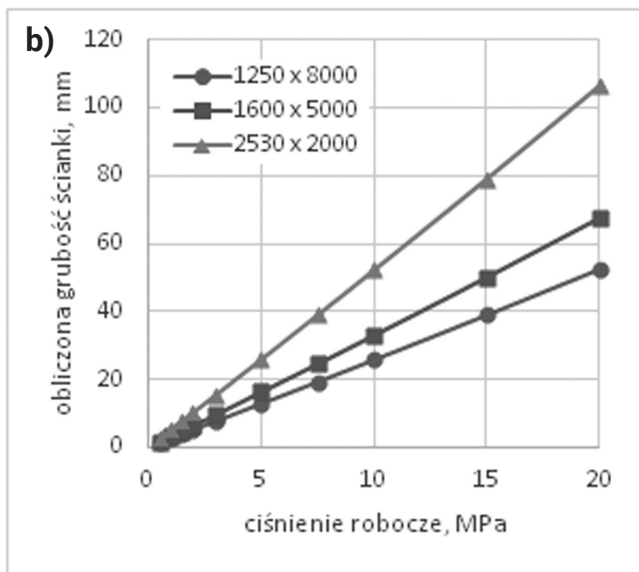
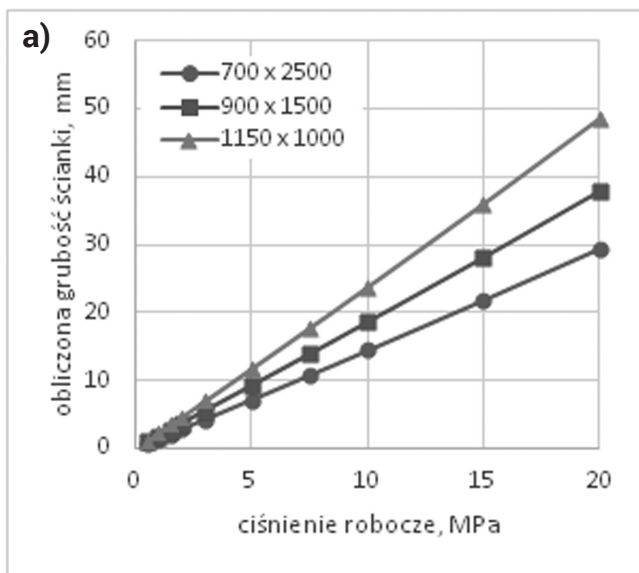
Wymiary (średnica/długość) mm	Wartość ciśnienia roboczego MPa	Grubość ścianki mm
700x2500	0,5	0,71
	1	1,42
	1,5	2,13
	2	2,84
	3	4,27
	5	7,15
	7,5	10,77
	10	14,44
	15	21,88
	20	29,48
900x1500	0,5	0,91
	1	1,82
	1,5	2,74
	2	3,65
	3	5,49
	5	9,19
	7,5	13,85
	10	18,56
	15	28,13
	20	37,91
1150x1000	0,5	1,16
	1	2,33
	1,5	3,5
	2	4,67
	3	7,01
	5	11,74
	7,5	17,7
	10	23,72
	15	35,95
	20	48,44

Tablica IV. Wartość obliczeniowej grubości ścianki w funkcji ciśnienia pracy dla trzech wariantów wymiarowych zbiornika o objętości 10 m³
Table IV. Value of computed wall thickness as a function of work pressure for three size variants of a 10 m³ volume tank

Wymiary (średnica/długość) mm	Wartość ciśnienia roboczego MPa	Grubość ścianki mm
1250x8000	0,5	1,26
	1	2,53
	1,5	3,8
	2	5,07
	3	7,62
	5	12,76
	7,5	19,24
	10	25,78
	15	39,07
	20	52,65
1600x5000	0,5	1,62
	1	3,24
	1,5	4,86
	2	6,49
	3	9,76
	5	16,39
	7,5	24,62
	10	33
	15	50,02
	20	67,39
2530x2000	0,5	2,56
	1	5,12
	1,5	7,69
	2	10,27
	3	15,43
	5	25,82
	7,5	38,94
	10	52,18
	15	79,09
	20	106,56

1250x8000 mm) pokazują, że mimo dziesięciokrotnej różnicy pojemności, przy tych samych ciśnieniach i różnicy średnic wynoszącej jedynie 100 mm, kąt nachylenia krzy-

wej, a tym samym obliczone grubości ścianki są bardzo zbliżone. Potwierdza to wyniki poprzedniej analizy zmiany wymiarów zbiornika.



Rys. 3. Wpływ ciśnienia roboczego i wymiarów zbiornika o objętości 1 m³ (a) i 10 m³ (b) na grubość jego ścianki

Fig. 3. Influence of work pressure and vessel dimensions on wall thickness for two tank volumes: 1 m³ (a) and 10 m³ (b)

Porównanie rozwiązań konstrukcyjnych dennic

W opracowanej formule obliczeniowej możliwe jest określenie grubości ścianki kilku rozwiązań konstrukcyjnych dennic: wypukłych (elipsoidalne, koszykowe, kuliste), płaskich bez wyoblenia, płaskich wyoblonych, płaskich wzmocnionych żebrami, płaskich kątach. Tak jak w przypadku części walcowej, podczas projektowania tej części zbiornika, należy na podstawie odpowiedniego zbioru wzorów określić wymaganą grubość ścianki w poszczególnych częściach dna, w zależności od warunków jego pracy. Materiał dna jest zazwyczaj taki sam, jak w części walcowej i taki przyjęto do analizy. Współczynniki bezpieczeństwa brane pod uwagę podczas obliczania naprężeń dopuszczalnych są uzależnione od rodzaju dna. Kształt dna jest dobierany na podstawie warunków wytrzymałościowych, ale ważnym aspektem jest sposób wykorzystania jego geometrii w czasie pracy. W praktyce w urządzeniach ciśnieniowych najczęściej spotyka się dna wypukłe [9]. Obliczenia przeprowadzono dla różnych wariantów den o kształtach: wypukłych i płaskich. Nie sporządzono analizy dla den stożkowych, ponieważ wiążące wzory [4] dają możliwość prowadzenia obliczeń jedynie dla kąta nachylenia tworzącej do osi stożka $\beta \leq 30^\circ$, a takie

dna w praktyce są bardzo rzadko stosowane. Obliczenia zostały przeprowadzone dla zbiornika o długości 5000 mm i średnicy wewnętrznej równej 1500 mm. Przyjęto ciśnienie pracy o wartości 1 MPa.

Tablica V. Grubość ścianki dennicy w zależności od kształtu/konstrukcji zbiornika ciśnieniowego

Table V. Wall thickness of head in relation of pressure vessel shape/structure

Rodzaj dennicy	Grubość ścianki mm
wypukła	4
płaska bez wyoblenia	35
płaska wzmocniona żebrami	16
płaska kuta	35
płaska z wyobleniem	33
płaska z rowkiem odciążającym	40

Wyniki przedstawione w tabelicy V wskazują, iż najkorzystniejszym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest dno wypukłe, ponieważ wymagana grubość jego ścianki jest znacznie mniejsza od pozostałych stosowanych kształtów. W analizowanym przypadku do wykonania dennicy wypukłej wymagane jest zastosowanie stali o grubości 4 mm, natomiast następne standardowe rozwiązanie – dno płaskie z wyobleniem powoduje konieczność zwiększenia grubości do 33 mm. Nawet zastosowanie dodatkowych wzmocnień żebrami w dnie płaskim nie skutkuje znaczącą redukcją wymiaru grubości, która wynikowo i tak powinna być 4-krotnie większa niż w przypadku dna wypukłego. Przeprowadzona analiza uzasadnia słuszność stosowania den wypukłych, dlatego też aktualnie są najczęściej spotykanym rozwiązaniem urządzeń ciśnieniowych [9]. Stany naprężeń zbiorników z dnami płaskimi, szczególnie w obszarach styku den i części walcowych są źródłami silnych koncentracji naprężeń, stąd obliczone grubości ścianek, mają niekiedy kilkakrotnie większe wartości [10]. Z tego też powodu do ich analizy stosuje się inne modele obliczeniowe, przy pomocy których można wyznaczyć momenty działające wzdłuż promienia i obwodu dennicy [10]. Analityczne wyliczenie tych wielkości jest problematyczne i wymaga zaawansowanej wiedzy z dziedziny teorii powłok i płyt [10].

Wpływ geometrii dna wypukłego na grubość jego ścianki

Analizie poddano różne wersje wymiarowe dennic wypukłych, wybranych w poprzednim punkcie jako najkorzystniejsze z ekonomicznego punktu widzenia. Określono wpływ geometrii dna wypukłego na grubość ścianki. Grubość ścianki dna w części wypukłej wyznacza się z zależności:

$$g_o^w = \frac{D_z \cdot p_o \cdot y_w}{4 \cdot k}$$

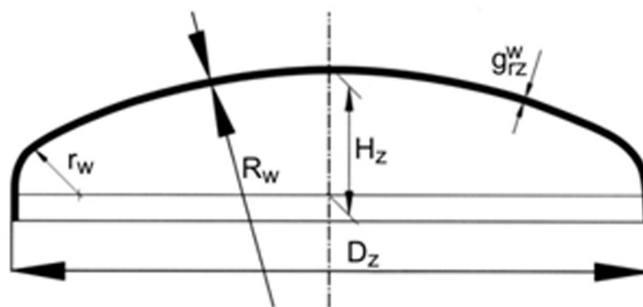
gdzie:

- D_z – średnica zewnętrzna dna, mm
- p_o – ciśnienie obliczeniowe, MPa
- y_w – współczynnik wytrzymałościowy
- k – naprężenia dopuszczalne, MPa

W przypadku gdy w dno jest spawane, grubość ścianki należy podzielić przez współczynnik osłabienia złączami spawanymi z_b , określony na podstawie stosownej tabeli z WUDT, zgodnie z zależnością:

$$g_o \geq \frac{g_o^w}{z_b}$$

W początkowej fazie obliczeń wyznaczono podstawowe zależności kształtowo-geometryczne: maksymalną wartość promienia wypukłości oraz minimalne wartości wysokości dna i promienia wyoblenia. Wartości obu promieni są uzależnione od rzeczywistej grubości ścianki, więc przyjmuje się je na podstawie optymalizacji. Mimo tego, że materiał stosowany na dna jest zazwyczaj taki sam, jak w części walcowej, to naprężenia dopuszczalne mają inną wartość, ponieważ współczynniki bezpieczeństwa, jakie należy przyjąć są inne niż w przypadku płaszcza. Założone ciśnienie obliczeniowe wynosiło 1 MPa. Charakterystyczne wielkości geometryczne dennicy pokazano na rysunku 4, a wyniki analizy zamieszczono w tabelicy VI.



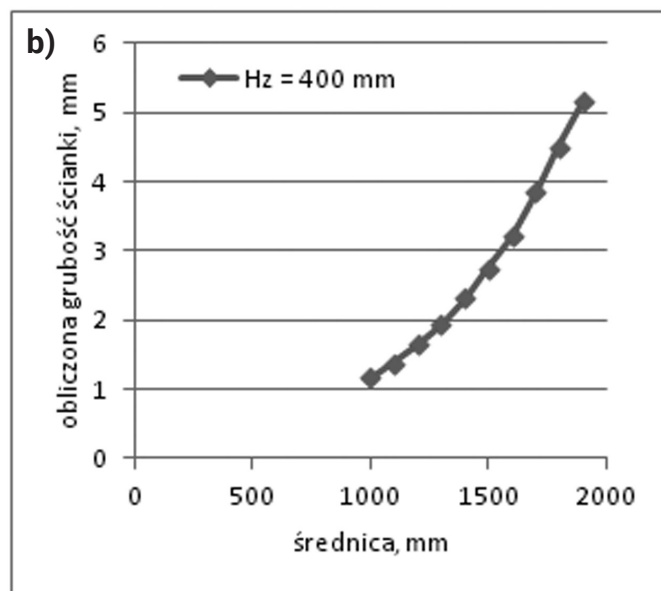
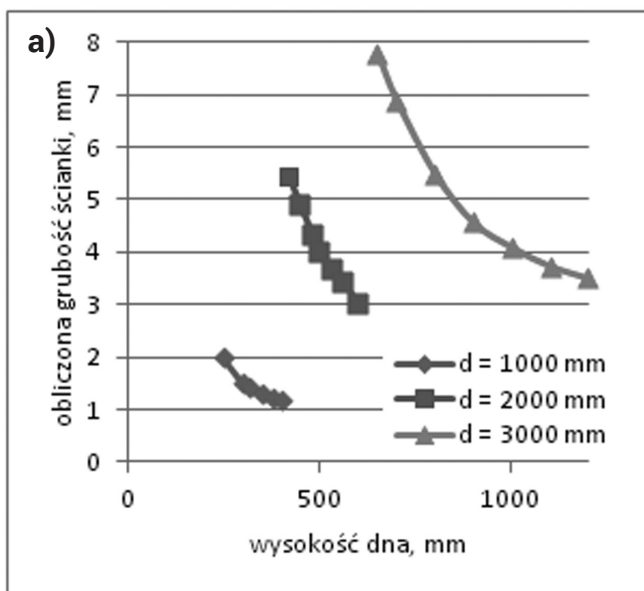
Rys. 4. Charakterystyczne wielkości geometryczne dennicy wypukłej
Fig. 4. Characteristic geometric attributes of dished head

Tablica VI. Wpływ geometrii dna wypukłego na grubość jego ścianki
Table VI. Influence of dished head geometry on its wall thickness

Średnica wewnętrzna dna, mm	Max. dop. promień wypukłości mm	Wymagany promień wypukłości mm	Min. dop. promień wyoblenia mm	Wymagany promień wyoblenia mm	Min. dop. wysokość dna, mm	Wysokość zewnętrzna dna, mm	Grubość ścianki dna, mm
1000	1004	936	100,4	159	180,72	250	2,00
1000	1004	894	100,4	144	180,72	300	1,53
1000	1004	886	100,4	138	180,72	320	1,43
1000	1004	879	100,4	130	180,72	350	1,29
1000	1004	879	100,4	121	180,72	380	1,22
1000	1004	881	100,4	115	180,72	400	1,17
2000	2012	1996	201,2	343	362,16	420	5,44
2000	2010	1941	201	333	361,8	450	4,90
2000	2010	1895	201	324	361,8	480	4,36
2000	2010	1869	201	318	361,98	500	4,01
2000	2008	1839	200,8	308	361,44	530	3,70
2000	2008	1814	200,8	300	361,44	560	3,42
2000	2008	1789	200,8	288	361,44	600	3,05
3000	3016	2956	301,6	508	542,88	650	7,79
3000	3014	2873	301,4	492	542,52	700	6,89
3000	3012	2754	301,2	461	542,16	800	5,50
3000	3010	2685	301	431	541,8	900	4,57
3000	3010	2648	301	402	541,8	1000	4,10
3000	3008	2638	300,8	373	541,44	1100	3,74
3000	3008	2646	300,8	344	541,44	1200	3,51

Analizując wyniki obliczeń można stwierdzić, że zarówno wysokość, jak i średnica, mają wpływ na grubość ścianki dna wypukłego. Zwiększenie wartości średnicy dna, tak jak w przypadku części walcowej zbiornika, powoduje wzrost wymaganej grubości ścianki. Jednakże przy tej samej wartości średnicy zwiększenie wysokości dna wpływa korzystnie na jego wytrzymałość, co skutkuje zmniejszeniem grubości obliczeniowej ścianki (rys. 5a). Ustalane na początku obliczeń wartości dopuszczalne wysokości dna, promienia wypukłości i promienia wyoblenia zależą jedynie

od średnicy fragmentu części walcowej. Wymagana wartość promieni wypukłości oraz wyoblenia maleje ze wzrostem wysokości dna. Natomiast zwiększenie jego średnicy powoduje dokładnie odwrotny skutek. W celu sprawdzenia wpływu zmiany średnicy dna na grubość ścianki przy stałej wartości wysokości części wypukłej przeprowadzono dodatkowe obliczenia dla $H_z = 400$ mm. Wynika z niej jednoznacznie, że wraz ze wzrostem średnicy, zwiększają się wymagania wytrzymałościowe konstrukcji, stąd konieczność zastosowania grubszej ścianki dna (rys. 5b).

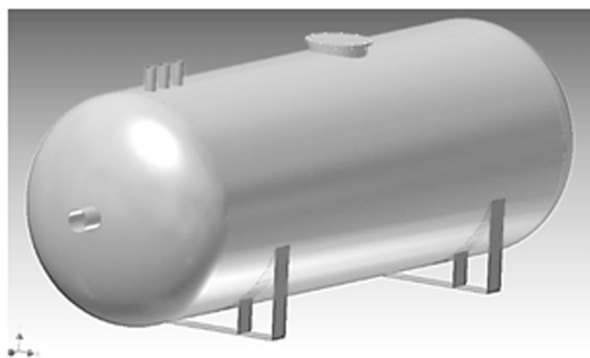


Rys. 5. Obliczona grubość ścianki dennicy wypukłej w funkcji: wysokości dla trzech wartości średnic (a) i średnicy dla stałej wartości wysokości $H_z = 400$ mm (b)

Fig. 5. Calculated thickness of dished head wall as a function of: height for three values of diameter (a) and diameter at constant height value $H_z = 400$ mm (b)

Sprawdzenie stateczności zbiornika poziomego

W celu sprawdzenia stateczności zbiornika pracującego w pozycji poziomej w zaprojektowano zbiornik o parametrach konstrukcyjnych zamieszczonych w tabelicy VII, w którego płaszczu występują 3 króćce rozmieszczone w rzędzie (rys. 6). W obu dennicach wypukłych zbiornika są umieszczone króćce o średnicy wewnętrznej 200 mm. Króćce są montowane za pomocą spoiny obustronnej, co pozwala przyjąć w obliczeniach ich średnice wewnętrzne [4]. Ciśnienie obliczeniowe wynosiło 1 MPa. Masę zbiornika (1065 kg) określono po zamodelowaniu go w programie Autodesk Inventor, a odległość między podporami 3000 mm.



Rys. 6. Konstrukcja zbiornika ciśnieniowego zastosowanego jako przykład obliczeniowy

Fig. 6. Construction of pressure vessel used as a calculation example

Tablica VII. Parametry konstrukcyjne zaprojektowanego zbiornika ciśnieniowego

Table VII. Construction parameters of designed pressure vessel

Temperatura pracy	20	°C
Objętość całkowita zbiornika	15,7	m ³
Maksymalne ciśnienie dopuszczalne	1	MPa
Średnica wewnętrzna zbiornika	2000	mm
Średnica wężu rewizyjnego	500	mm
Długość zbiornika	5000	mm
Zewnętrzna wysokość dna	600	mm
Wysokość części walcowej dna	6	mm
Promień wyoblenia dna	288	mm
Promień wypukłości dna	1789	mm
Przyjęta (obliczona) grubość ścianki części walcowej z uwzględnieniem otworów	14 (12,56)	mm
Przyjęta (obliczona) grubość ścianki dennicy z uwzględnieniem otworów	8 (6,18)	mm
Przyjęta (obliczona) grubość ścianki części walcowej bez otworów	6 (4,05)	mm
Przyjęta (obliczona) grubość ścianki dennicy bez otworów	5 (3,05)	mm
Przyjęta grubość ścianki króćca w dennicy	5 (0,34)	mm
Przyjęta grubość ścianki króćca o średnicy Ø100 mm	5 (4,056)	mm
Przyjęta grubość ścianki wężu	5 (4,056)	mm
Grubość wzmocnienia w części walcowej	6	mm
Grubość wzmocnienia dennicy	3	mm

Maksymalny moment gnący wyznacza się traktując zbiornik jako belkę z obciążeniem ciągłym, podpartą w dwóch lub większej ilości punktów. Obciążenie ciągłe jest spowodowane masą wszystkich elementów składowych zbiornika oraz medium znajdującego się w jego wnętrzu. Podczas obliczania wskaźnika zginania należy uwzględnić otwory w przekroju. Zbiornik poziomy musi spełniać zależność [4,5]:

$$\left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2}{z_2} - \sigma_g\right)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{z_2} + \sigma_g - \sigma_3\right)^2 \leq 2 \cdot k^2$$

$$\sigma_1 = \frac{p_o \cdot D_w}{2 \cdot g_{rz}}, \sigma_2 = \frac{p_o \cdot D_w^2}{4 \cdot (D_w + g_{rz}) \cdot g_{rz}}, \sigma_3 = -\frac{p_o}{2}, \sigma_g = \frac{M}{W}$$

gdzie:

p_o – ciśnienie obliczeniowe, MPa

D_w – średnica wewnętrzna elementu, mm

g_{rz} – grubość rzeczywista elementu, mm

W – wskaźnik zginania

M – maksymalny moment gnący

Dla wyznaczonych parametrów konstrukcyjnych (tabl. VII) powyższa zależność nie jest spełniona, w związku z czym należy przeprowadzić zmiany konstrukcyjne elementu ciśnieniowego lub zwiększyć grubość jego ścianki [4]. Popularnym rozwiązaniem jest zmiana rozstawu podpór [4]. W tym wypadku po wprowadzeniu korekty rozstawu podpór lewa strona równania nadal pozostaje większa od prawej, zatem należy zwiększyć grubość ścianki zbiornika i ponownie wyznaczyć grubości wzmocnień. Po zwiększeniu grubości ścianki o 1 mm w stosunku do przyjętej w tablicy VII warunek został spełniony.

Wnioski

Na podstawie analiz przeprowadzonych z wykorzystaniem opracowanej formuły obliczeniowej bazującej na treści WUDT, sformułowano następujące wnioski dotyczące konstruowania zbiorników ciśnieniowych:

- Grubość ścianki części walcowej zbiornika jest silnie uzależniona od jego średnicy i ciśnienia obliczeniowego. Zmiana pojemności zbiornika wywołana zwiększaniem jego długości przy stałej średnicy i ciśnieniu, nie ma wpływu na wymiar ścianki zbiornika. Jeżeli objętość zbiornika jest stała, to grubość ścianki wzrasta liniowo względem ciśnienia. Zauważono również, że przy zbliżonych wartościach średnic i dziesięciokrotnej różnicy objętości, wzrost ciśnienia powoduje wzrost wymaganej grubości ścianki o podobne wartości.
- Porównanie rozwiązań konstrukcyjnych dennic wykazało, że najkorzystniejszą geometrią jest dno wypukłe. Grubość jego ścianki przy tych samych warunkach pracy i jednakowych parametrach jest znacząco niższa w stosunku do pozostałych den. W przypadku dennic płaskich nawet stosowanie żeber wzmocniających nie pozwala uzyskać tak niskiej grubości ścianki.
- Sprawdzenie stateczności projektowanego zbiornika pracującego w pozycji poziomej polega na weryfikacji warunku naprężeniowego, wyznaczanego na podstawie parametrów konstrukcyjnych urządzenia ciśnieniowego. Jeśli określona wzorem zależność nie jest spełniona, projektant powinien skorygować zależności kształtowo-wymiarowe lub parametry pracy zbiornika.
- Dla stałej wartości ciśnienia, istnieje możliwość redukcji grubości blachy wraz ze wzrostem długości zbiornika. Jednak wymiar liniowy długości może mieć istotny wpływ na konieczność spełnienia warunku zachowania stateczności. W przypadku zdolności wygenerowania znaczących oszczędności w wyniku obniżenia wymiaru grubości ścianki, istnieje możliwość zastosowania większej ilości podpór.
- Opracowana formuła obliczeniowa daje możliwości kompetentnego, a przede wszystkim szybkiego optymalizowania wymiarów zbiorników ciśnieniowych, co w efekcie pozwala na sprawdzenie wielu rozwiązań konstrukcyjnych zbiorników oraz wyboru najkorzystniejszego strukturalnie i najbardziej ekonomicznego. Zredukowana grubość ścianki zbiorników ciśnieniowych to nie tylko oszczędności materiałowe, ale również kompresja czasu produkcyjnego oraz uproszczenie technologii wytwarzania.

Literatura

- [1] Dyrektywa 2014/68/UE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie harmonizacji ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do udostępnienia na rynku urządzeń ciśnieniowych, 15.05.2014.
- [2] Dyrektywa 97/23/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich dotyczących urządzeń ciśnieniowych, 29.05.1997.
- [3] Dyrektywy urządzenia ciśnieniowe 97/23/WE oraz proste zbiorniki ciśnieniowe 2009/105/WE, broszura informacyjna, Projekt PL 0426: Wsparcie administracji publicznej, organizacji pozarządowych i organizacji przedsiębiorców w procesie upowszechniania wśród małych i średnich przedsiębiorstw wiedzy na temat Dyrektyw Nowego i Globalnego Podejścia, Warszawa 2010.
- [4] Warunki Urzędu Dozoru Technicznego WUDT-UC-2003, Wydanie 2, Urząd Dozoru Technicznego, Warszawa 2005.
- [5] www.udt.gov.pl
- [6] Dudek J.: Metoda odprężania mechanicznego naczyń ciśnieniowych, Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Raport serii PRE 2/07, Wrocław 2007.
- [7] Dudek A., Łaczek S.: Zbiornik ciśnieniowy spawany, materiały pomocnicze do projektu z podstaw konstrukcji maszyn, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
- [8] Słania J., Kaczor T.: Plan spawania zbiornika ciśnieniowego, Przegląd Spawalnictwa, nr 4/2010.
- [9] Pikoń J.: Podstawy konstrukcji aparatury chemicznej, Elementy aparatury chemicznej, Część II, PWN, Warszawa 1979.
- [10] Sędek P.: Projektowanie urządzeń ciśnieniowych, Materiały szkoleniowe: Kurs Międzynarodowego Inżyniera Spawalnika, Instytut Spawalnictwa, Gliwice 2012.