



JERZY ZIÓŁKO, *jziolko@pg.gda.pl*

Uniwersytet Technologiczno – Przyrodniczy w Bydgoszczy

EWA SUPERNAK, *esuper@pg.gda.pl*

Politechnika Gdańska

## NAPRAWA STALOWEGO ZBIORNIKA USZKODZONEGO PRZEZ PODCIŚNIENIE

### REPAIR OF A STEEL TANK DAMAGED BY VACUUM

**Streszczenie** Omówiono naprawę płaszcza walcowego, pionowego zbiornika na olej opałowy uszkodzonego przez podciśnienie. Zbiornik ma pojemność  $V = 5\,000\text{ m}^3$ . Naprawę zrealizowano w dwóch etapach: I etap – wypełnienie zbiornika wodą i wstępne przywrócenie jego płaszczeni kształtu zbliżonego do walcowego,

II etap – wycięcie najbardziej zdeformowanych blach płaszcza, korekta kształtu przez lokalne nagrzewanie palnikiem wielogłowicowym, zaspawanie wyciętych otworów nakładkami z blach przyłożonych po zewnętrznej stronie płaszcza i przyspawanych dwustronnymi spoinami pachwinowymi. Uzyskano bardzo dobry efekt naprawy.

**Abstract** Repair of the shell of a vertical cylindrical tank for fuel oil, damaged by vacuum, is described. The tank capacity is  $V = 5\,000\text{ m}^3$ . The repair has been made in two stages:

Stage I – filling the tank with water and preliminarily restoring approximately cylindrical shell form,

Stage II – cutting out the most severely deformed plates of the shell, correcting the shape by locally heating with a multi-head torch, closing the holes cut out by putting plates on the outer side of the shell and welding to it using double-sided fillet welds.

A very good result of the repair has been achieved.

### 1. Ogólna charakterystyka uszkodzonego zbiornika

Zbiornik został wybudowany w 1975 roku, ma pojemność nominalną  $V = 5\,000\text{ m}^3$ , jest walcowy pionowy i ma stały kopulasty dach.

Charakterystyczne wymiary zbiornika są następujące:

- średnica wewnętrzna płaszcza  $d_w = 24\,760\text{ mm}$
- wysokość płaszcza  $h = 11\,970\text{ mm}$
- strzałka kopuły  $f = 2\,400\text{ mm}$ .

Dno zbiornika jest płaskie i ma następujące grubości:

- pierścień obrzeżny – 10 mm,
- środkowa część – 6 mm.

Płaszcz składa się z sześciu pierścieni blach (carg) o grubościach 15; 13; 10; 8; 5 i 5 mm. Styki blach płaszcza zarówno pionowe jak i poziome (obwodowe) wykonane są jako czołowe.

Konstrukcja nośna dachu składa się z 24 łukowych żebier wykonanych z dwuteownika IPE 220 połączonych w osi zbiornika zwornikiem i siedmioma wielobocznymi pierścieniami płatwi. Płatwie te wykonane są: w pierwszym pierścieniu od obwodu płaszcza z ceownika [80, w drugim i trzecim pierścieniu z ceownika [65, w pozostałych pierścieniach z ceownika

[50. Kratowe stężenie wiatrowe wykonane zostało w trzech polach pomiędzy łukowymi zebrami dachu. Stężenia rozmieszczone są co 120°. Pokrycie dachu zaprojektowane zostało z blach grubości 4,0 mm.

Cały zbiornik zaprojektowano ze stali gatunku St3SY. Zbiornik przystosowany był do magazynowania oleju opałowego o gęstości  $950 \text{ kg/m}^3$  w temperaturze do  $120^\circ\text{C}$ . Zawory oddechowe (zarówno nadciśnieniowy jak i podciśnieniowy) według projektu powinny być nastawione na ciśnienie 0,25 kPa. Zbiornik ma płaszcz izolowany matami z wełny mineralnej, które z zewnątrz osłonięte są blachami aluminiowymi. Dach zbiornika nie jest izolowany.

## 2. Przyczyny awarii i stan zbiornika po awarii

W styczniu 2010 roku przedmiotowy zbiornik został uszkodzony przez wytworzone w nim podciśnienie. Po opadach śniegu na zaworze oddechowym na dachu zbiornika utworzyła się zaspą, która podczas krótkotrwałego ocieplenia została wprawdzie usunięta przez służbę utrzymania ruchu ale wewnątrz zaworu pozostała wilgoć. Przy kolejnym spadku temperatury do  $-5^\circ\text{C}$  wilgoć ta zamieniła się w lód, który spowodował przymarznącie do łożysk „grzybków” otwierających dostęp powietrza do wnętrza zbiornika wówczas gdy zaczynało występować w nim podciśnienie. W nocy, w której zaistniała awaria ze zbiornika wypompowano  $1\,721 \text{ m}^3$  magazynowanego w nim oleju opałowego, czyli około 1/3 całkowitej pojemności zbiornika. Ponieważ zbiornik był całkowicie szczelny, wytworzone w nim podciśnienie poważnie zdeformowało górną część płaszczu na długości stanowiącej około 1/3 obwodu zbiornika (rys. 1 i 1a).



Rys. 1. Widok ogólny zbiornika



Rys. 1a. Zbliżenie deformacji blach płaszczu zbiornika

Dach nie miał widocznych deformacji lecz pomiary geodezyjne wykazały, że na zdeformowanym odcinku płaszczu pochylił się w całości. Nie stwierdzono natomiast uszkodzenia spiny łączącej pokrycie dachowe z obwodem płaszczu. Wykonane wrywkowe pomiary geodezyjne wewnątrz zbiornika wykazały, że największe deformacje płaszczu mają strzałkę odchylenia od prawidłowego walcowego kształtu do 700 mm. Niestety użytkownik zbiornika, zainteresowany jak najszybszym ponownym włączeniem zbiornika do eksploatacji nie wyraził zgody na szczegółowe pomiary deformacji płaszczu wzdłuż jego tworzących.

Pomiary wykonano tylko w 55 punktach nieregularnie rozmieszczonych na deformacjach płaszcza. Punkty te zostały jednak trwale oznaczone co pozwoliło na ocenę skuteczności roztlóczenia hydrostatycznego zastosowanego jako pierwszy etap przywracania zbiornikowi prawidłowego kształtu. Po zdemontowaniu izolacji termicznej na zdeformowanej części płaszcza stwierdzono, że największe deformacje występują na drugim pierścieniu blach płaszcza (cardze) licząc od górnej jego krawędzi. Deformacje te jako wklęsnięcia i wypukłości, lecz o znacznie mniejszej wartości, przenosiły się także na sąsiednie pierścienie blach. W pięciu miejscach drugiego pierścienia blach płaszcza występowały deformacje z ostrymi załamaniem blach (rys. 2).



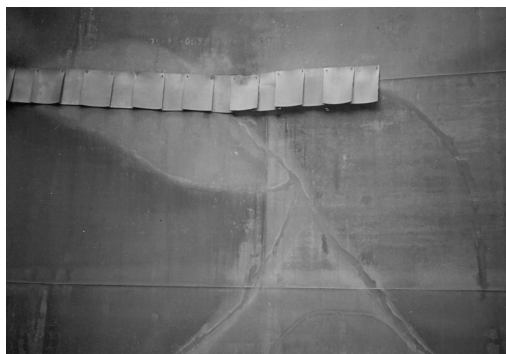
Rys. 2. Ostre załamania blach płaszcza widoczne po rozizolowaniu zbiornika

### 3. Naprawa zbiornika

Naprawę postanowiono rozpocząć od wypełnienia zbiornika wodą aby parciem hydrostatycznym zmniejszyć wartość wklęsnięć i wypukłości jego płaszcza. Dalsze działania naprawcze opracowano w dwóch wariantach w zależności od efektów jakie uzyska się po roztlóczeniu hydraulicznym. Taki sposób opracowania dokumentacji remontowej był konieczny, aby firmy przystępujące do przetargu na naprawę zbiornika znały zakres i przewidywaną technologię naprawy. W obu wariantach drugiej fazy remontu zakładano wycięcie w drugim od góry pierścieniu płaszcza tych fragmentów blach, na których występowały ostre załamania. Różnica w obu wariantach drugiego etapu remontu polegała na tym, czy będzie czy nie będzie konieczne mechaniczne kształtowanie blach po roztlóczeniu hydrostatycznym płaszcza. Przy naprawie omawianego zbiornika stosowanie montażowych pierścieni profilujących i dociąganie do nich blach płaszcza jarzmami okazało się zbędne. Przechodząc do omówienia czynności remontowych w kolejności ich wykonania należy podać, że przed wypełnieniem zbiornika wodą obawiano się pęknięć blach w sąsiedztwie ostrych ich załamów. Wytypowano więc miejsca prawdopodobnych pęknięć i pokryto je fartuchami z gumy, które miały być dociskane do płaszcza parciem wody wprowadzonej do zbiornika. Fartuchy miały wysokość około 50÷60 cm i składały się z odcinków czterdziestocentymetrowej długości nałożonych na siebie w stykach pionowych i przymocowanych do płaszcza

blachowkrętami tylko na górnej krawędzi (rys. 3). Taka konstrukcja fartucha zapewniała dość dobre jego dopasowywanie się do zdeformowanego płaszcza, którego wklęsnięcia i wypukłości przemieszczają się w miarę napełniania zbiornika wodą i zwiększającego się jej nacisku na płaszczyznę.

Po hydrostatycznym rozłoczeniu zbiornika, które trwało 72 godziny stwierdzono bardzo wyraźną poprawę jego kształtu i tylko jeden mały wyciek, który wkrótce ustał prawdopodobnie na wskutek zamulenia nieszczelności produktami korozji spływającymi wraz z wodą (rys. 4).



Rys. 3. Fartuchy gumowe przymocowane do płaszcza zbiornika



Rys. 4. Niewielki wyciek wody spowodowany pęknięciem blach płaszcza na ostrym załamaniu podczas rozłaczania hydrostatycznego

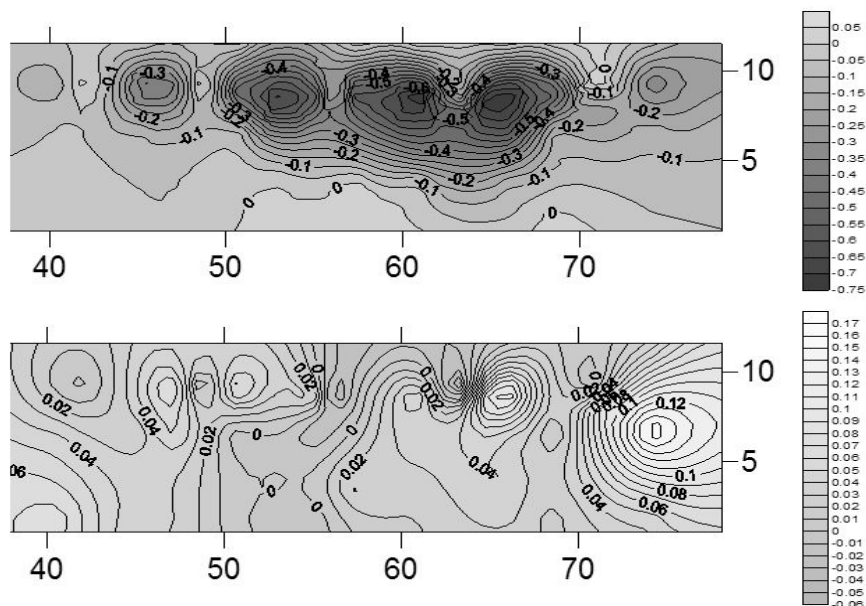
Po wypuszczeniu wody ze zbiornika deformacje bardzo zmniejszone częściowo powróciły – obrazują to wyniki pomiarów geodezyjnych zamieszczone w tabelicy 1 oraz wykonana na ich podstawie symulacja komputerowa – mapa deformacji (rys. 5).

Tablica 1. Porównanie wyników pomiarów geodezyjnych wartości odkształceń płaszcza od prawidłowego kształtu po awarii i po rozłaczaniu hydrostatycznym

Nr punktu pomiarowego (zastosowano numerację przyjętą przez geodetę)	Odchyłki płaszcza zbiornika od prawidłowego kształtu walcowego (przyjęta przez geodetę wartość projektowa promienia płaszcza zbiornika $r = 12,33$ m) w metrach		Różnica pomierzonych odchyłek przed i po rozłaczaniu hydrostatycznym
	(-) oznacza deformacje skierowane do wnętrza zbiornika		
	po awarii	po rozłaczaniu hydrostatycznym	
749	0,01	0,01	0,00
750	-0,09	0,04	0,14
751	0,01	0,01	0,00
752	0,04	-0,03	-0,07
753	0,09	0,05	-0,04
754	0,00	brak danych	brak danych
755	-0,38	0,01	<b>0,39</b>
756	-0,06	0,03	0,09

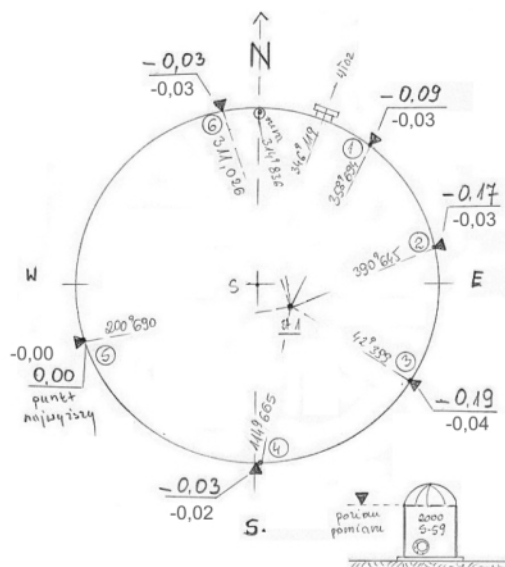
Tablica 1. c.d.

757	-0,33	-0,03	<b>0,30</b>
758	-0,08	-0,01	0,07
759	0,00	0,02	0,02
760	0,07	0,06	-0,01
761	0,02	brak danych	brak danych
762	-0,44	-0,02	<b>0,42</b>
763	-0,03	0,06	0,09
764	0,05	0,05	0,00
765	-0,65	0,03	<b>0,68</b>
766	0,04	0,05	0,01
767	-0,50	0,01	<b>0,51</b>
768	-0,25	0,07	<b>0,32</b>
769	0,06	0,06	0,00
770	-0,07	0,10	0,17
771	0,02	0,08	0,06
772	-0,55	0,06	<b>0,61</b>
773	0,08	0,02	-0,06
774	0,02	0,06	0,04
775	-0,73	0,00	<b>0,73</b>
776	-0,32	0,02	<b>0,34</b>
777	0,01	0,03	0,02
778	0,03	0,03	0,00
779	-0,06	0,11	0,17
780	-0,65	-0,04	<b>0,61</b>
781	0,02	0,04	0,02
782	-0,70	-0,07	<b>0,63</b>
783	-0,48	0,01	<b>0,49</b>
784	-0,06	0,01	0,07
785	-0,01	0,02	0,03
786	0,03	0,04	0,01
787	-0,46	0,03	<b>0,49</b>
788	-0,08	0,04	0,12
789	0,06	0,03	-0,03
790	0,13	0,06	-0,07
791	-0,20	-0,03	0,17
792	-0,03	0,02	0,05
793	-0,31	-0,04	0,27
....			
802	0,00	0,01	0,01
803	-0,01	-0,01	0,00



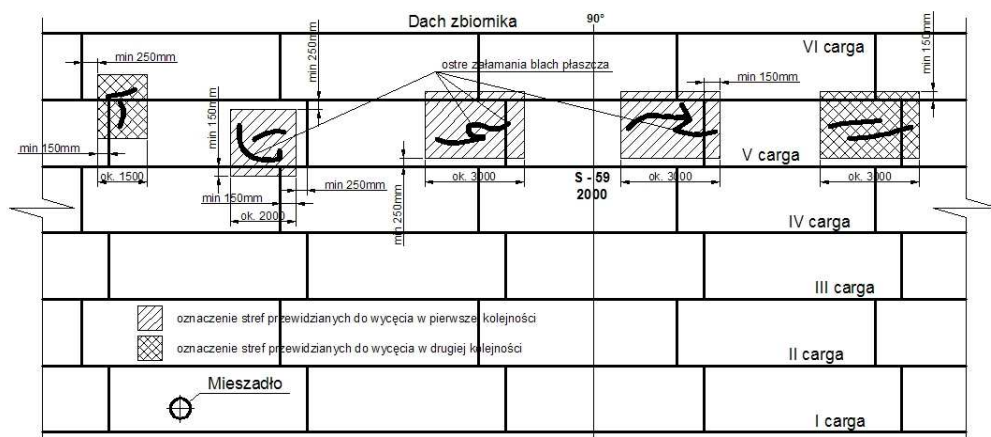
Rys. 5. Warstwice przedstawiające deformacje płaszcza na jego rozwinięciu przed napełnieniem zbiornika wodą (górny rysunek) i po wypompowaniu wody (dolny rysunek). Wymiary podano w metrach

Bardzo znamienne są też wyniki pomiarów wysokości wybranych punktów na dachu zbiornika w jego styku z płaszczem – wskazują one, że dach znacznie podniósł się w tej strefie, w której płaszcz miał największe deformacje (rys. 6). Jest to zrozumiałe – w płaszczu zmniejszone zostały deformacje wypychając dach ku górze.



Rys. 6. Położenie reperów na styku dachu z płaszczem w porównaniu z poziomem prawidłowym, przed napełnieniem zbiornika wodą (napis odręczny nad kreską) i po wypompowaniu wody (druk pod kreską). Wymiary podano w metrach

Po przeanalizowaniu kształtu płaszcza po rozciąganiu hydraulicznym wytypowano pięć odcinków drugiego od góry pierścienia blach, na których ostre załamania blach utrudniały przywrócenie prawidłowego walcowego kształtu blachom sąsiednim (rys. 7). Wymiary wycięć określono z poziomu terenu przed wykonaniem rusztowań. Po zmontowaniu rusztowań uznano, że długość wycięć należy powiększyć (rys. 8).



Rys. 7. Orientacyjne usytuowanie ostrych załamania blach na V cardze płaszcza (drugiej od góry) oraz zalecane strefy wycięcia blach na początku drugiego etapu naprawy zbiornika

Ponieważ wymiarowo duże wycięcia miały być wykonane na odcinku obwodu o długości ponad 25,0 m, a pozostawione pomiędzy wycięciami odcinki blach płaszcza będą wąskie obawiano się, że obwód dachu tracąc ciągle podparcie na płaszczu może się ponownie ugiąć. Dlatego na czas naprawy płaszcza zalecono podparcie rurowymi słupami co drugiego żebra konstrukcji nośnej dachu na odcinku objętym wycinką blach w płaszczu – zaplanowano pięć słupów podpierających. Słupy te wprowadzono do wnętrza zbiornika przez otwory wycięte w pokryciu dachowym (rys. 8).



Rys. 8. Wycięte w płaszczu zbiornika fragmenty blach z ostrymi załamaniem oraz otwory w pokryciu dachowym służące do wprowadzenia słupów podporowych

Słupy zostały przyspawane do żeber nośnych kopuły dachowej, a dołem oparte na dnie zbiornika za pośrednictwem klinów. Gdy wycięto zdeformowane blachy płaszczu trzy słupy podniosły się z klinów o około  $4\pm 5$  mm – świadczy to, że blachy z ostrymi załamaniem istotnie wywierały wpływ na stan deformacji płaszczu. Kształt płaszczu uzyskany po wycięciu blach zdeformowanych był prawie zadawalający, postanowiono jednak jeszcze go poprawić metodą nagrzewania palnikiem wielodyszowym pozostałych zdeformowanych stref zbiornika. Efekt tego działania był bardzo dobry dzięki przeprowadzeniu nagrzewania przez wyspecjalizowanego w tych pracach montażystę. Wycięte otwory w płaszczu zamknięto blachami grubości 5 mm o wymiarach umożliwiających zastosowanie styków zakładkowych z  $40\pm 60$  mm nakładką, spawanych z obu stron płaszczu spoinami pachwinowymi. Styki poziome „łaty” były przesunięte o min. 150 mm w stosunku do istniejących spoin obwodowych pomiędzy pierścieniami blach (cargami). Celowo pominięto styki czołowe, aby nie występowała konieczność dokładnego dopasowywania „łat” do wyciętego otworu. Gdyby kształt „łaty” nie spełniał rygorystycznie podanego wyżej warunku nadmiernie gruba spoina na pewnym odcinku spawania wywołałaby odkształcenia spawalnicze mogące zniweczyć uzyskany dobry kształt płaszczu. Naprawiony zbiornik pokazany jest na rysunku 9.



Rys. 9. Naprawiony zbiornik przed zamontowaniem izolacji

#### 4. Podsumowanie

Naprawę płaszczu stalowego, walcowego, pionowego zbiornika na paliwa płynne uszkodzonego w wyniku wytworzonego w nim podciśnienia warto rozpoczynać od wypełnienia zbiornika wodą. Wstępnie zmniejszone tą metodą poawaryjne deformacje usuwa się w drugim etapie prac naprawczych przez wycięcie fragmentów blach z ostrymi załamaniem i nagrzewanie palnikiem wielogłowicowym miejsc o deformacjach uznanych za niedopuszczalne. Taką kolejność postępowania zastosowano przy naprawie kilku zbiorników, dało to dobre rezultaty zarówno techniczne jak i ekonomiczne (zmniejszono koszty remontu) [1÷5].

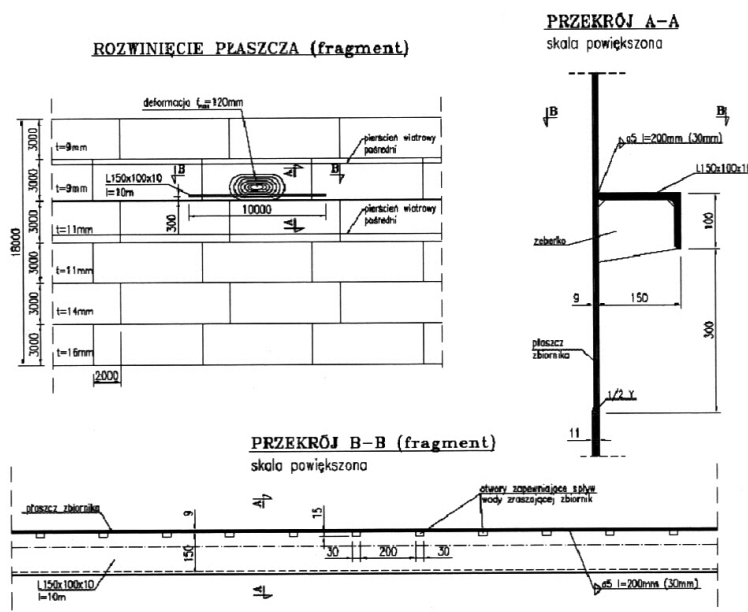
Roztłaczanie hydrostatyczne jest przydatne także przy usuwaniu niedopuszczalnych deformacji powstałych podczas budowy zbiornika. Przykład takiego działania omówiono w [6] i w skrócie przytoczono poniżej.



Dwupłaszczowy zbiornik o nominalnej pojemności  $20\,000\text{ m}^3$  zmontowany został z lokalną deformacją płaszcza o wartości przekraczającej normowo dopuszczalne odchyłki od prawidłowego kształtu. Główne wymiary zbiornika są następujące:

- średnica płaszcza wewnętrznego  $d_w = 40,00\text{ m}$ ,
- wysokość płaszcza wewnętrznego  $h_w = 18,00\text{ m}$ ,
- średnica płaszcza zewnętrznego (obudowy)  $d_z = 44,00\text{ m}$ ,
- wysokość płaszcza wewnętrznego  $h_z = 15,00\text{ m}$ .

Płaszcz wewnętrzny składa się z sześciu pierścieni blach – grubości ich podane są na rys. 10. Styki blach zarówno pionowe jak i poziome wykonano jako czołowe. Na szóstym pierścieniu blach w odległości  $1,10\text{ m}$  od górnej krawędzi płaszcza zaprojektowano główny pierścień wiatrowy usztywniający płaszcz a także spełniający funkcję chodnika dla obsługi. Na pierścieniach czwartym i piątym blach płaszcza wykonano pośrednie pierścienie wiatrowe z kątownika  $150 \times 100 \times 10$  przyspawane po zewnętrznej stronie płaszcza w sposób analogiczny jak pokazano na rysunku 10 – przekrój A – A.



Rys. 10. Zrealizowany sposób usunięcia lokalnej deformacji płaszcza zbiornika  $V = 20\,000\text{ m}^3$

Po zakończeniu montażu zbiornika na jednej blasze płaszcza ponad stykiem czwartego i piątego pierścienia stwierdzono lokalną deformację o maksymalnej strzałce  $120\text{ mm}$  skierowaną do wnętrza zbiornika. Inwestor odmówił przyjęcia tego zbiornika gdyż deformacja ta mogła utrudnić pionowe przemieszczanie się dachu pływającego a ponadto przekraczała dopuszczalną normowo (według PN-B-03210:1997) odchyłkę od pionu tworzącej płaszcz  $f_{dop} = 0,005 \cdot h = 0,005 \cdot 13500 = 67,5\text{ mm}$ .

Wykonawca zbiornika próbował usunąć deformację przez wyżłobienie 75% grubości spoin na obwodzie zdeformowanej blachy, następnie mechanicznie wyciągnął wklęsłość i ponownie zaspawał spoiny do prawidłowej grubości. Po zakończeniu spawania blacha odkształciła się ponownie a maksymalna strzałka wklęsłości wynosiła znowu  $120\text{ mm}$ . Politechnika Gdańska zaleciła więc inny sposób korekty kształtu płaszcza. Zbiornik został wypełniony wodą do górnej krawędzi płaszcza. Ciśnienie hydrostatyczne wody wypchnęło

na zewnątrz lokalną deformację. Wówczas, przy płaszczu wypełnionym wodą, przyspawano po zewnętrznej stronie dziesięciometrowy odcinek pierścienia usztywniającego z kątownika 150×100×10 mm (rys. 10). Kątownik ten miał ustabilizować kształt płaszcza osiągnięty przez hydrostatyczne rozłaczanie. Aby zmniejszyć nagrzanie płaszcza podczas spawania zastosowano technologię spawania wymagającą najmniejszej energii cieplnej – półautomatyczne spawanie gołym drutem w osłonie gazów ochronnych. Przy tej metodzie spawania odpada konieczność stapienia otuliny elektrody a więc wymagana jest mniejsza energia cieplna. W poziomym ramieniu kątownika – przyspawanym do płaszcza wykonano co 200 mm otwory 30×5 mm w celu zapewnienia spływu wody deszczowej. Po zakończeniu spawania omówionego usztywnienia płaszcza spuszczonego wodę ze zbiornika – lokalna deformacja na piątym pierścieniu blach przyjęła wartość 40 mm czyli była znacznie mniejsza niż normowo dopuszczalna odchyłka na tej wysokości płaszcza wynoszącej 67,5 mm. Efekt omówionej metody byłby lepszy gdyby zastosowano dłuższy niż 10,00 m kątownik usztywniający. Niestety tylko dziesięciometrowym odcinkiem kątownika dysponował wykonawca a termin przekazania zbiornika do eksploatacji nie zezwalał na zwłokę w zrealizowaniu naprawy.

Przy okazji tej naprawy powstało pytanie czy w blasze chłodzonej jednostronnie wodą wypełniającej zbiornik nie wystąpią podczas spawania zmiany właściwości wytrzymałościowych stali. Odpowiedź jest prosta – nie nastąpią większe zmiany niż przy spawaniu w warunkach zimowych stali S235 (z której wykonana była górna część płaszcza zbiornika). Stal taką można spawać przy temperaturze  $-5^{\circ}\text{C}$ , a woda w zbiorniku miała temperaturę  $+5^{\circ}\text{C}$  ponadto naprężenia w płaszczu w rejonie spawania wynosiły około 84,0 MPa czyli były znacznie mniejsze niż wytrzymałość obliczeniowa stali S235 wynosząca 215,0 MPa.

### Literatura

1. Ziółko J., Supernak E., Borek P., Jędrzejewski M.T.: Naprawa zbiorników cylindrycznych uszkodzonych wskutek podciśnienia, „Inżynieria i Budownictwo”, nr 7/1997.
2. Ziółko J., Supernak E.: Reparatur eines beschädigten Doppelmantel – Stahlbälters, „Bauingenieur”, Dezember 2003.
3. Ziółko J.: Remonty stalowych zbiorników na ropę naftową i paliwa płynne. LI Konferencja Naukowa KILiW PAN oraz KN PZITB „Krynica 2005”, tom I.
4. Ziółko J., Remonty i wzmocnienia stalowych zbiorników na paliwa płynne, „Inżynier Budownictwa”, nr 4-6/2009 (cz. I – nr 4, cz. II – nr 5, cz. III – nr 6).
5. Ziółko J., Supernak E., Heizig T.: Przedawaryjne remonty podczas eksploatacji zbiorników stalowych na ropę naftową. XXIII Konferencja Naukowo – Techniczna „Awarie Budowlane”, Szczecin – Międzyzdroje 2007.
6. Ziółko J.: Korekta kształtu płaszczy zbiorników stalowych wykonywane z wykorzystaniem rozłaczania hydrostatycznego. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 7/2009.