

## Imperfekcje stalowych zbiorników walcowych – przyczyny ich powstawania, sposoby ograniczania

Imperfekcje, o nadmiernej wartości lub intensywności występowania, stanowią duże zagrożenie bezpiecznej eksploatacji konstrukcji inżynierskiej, przyspieszają bowiem występowanie zjawisk:

- wyboczenia w konstrukcjach prętowych,
- lokalnej utraty stateczności w konstrukcjach płytowych lub powłokowych.

Imperfekcji nie można jednak całkowicie wyeliminować, gdyż wynikają one z technologii wytwarzania konstrukcji. Im konstrukcja jest bardziej cienkościenna i o większych wymiarach gabarytowych, tym więcej starań należy dołożyć, aby ograniczyć wartość imperfekcji, których przyczyną występowania są różne, niezależne od siebie, niedokładności i błędy popełnione przy wykonaniu obiektów inżynierskich.

Budowane współcześnie stalowe zbiorniki walcowe na paliwa płynne, zwłaszcza służące do długoterminowego magazynowania ropy naftowej, są obiektami imponującymi nie tylko wymiarami gabarytowymi, lecz zwłaszcza cienkościennością. Charakterystykę trzech typowych zbiorników podano w tabl. 1.

Tablica 1

Charakterystyka dużych walcowych zbiorników stalowych z dachami płyczącymi

Nominalna pojemność zbiornika m <sup>3</sup>	Wymiary gabarytowe m		Grubość blach płaszczu mm		Stosunek t/d	Powierzchnia płaszczu m <sup>2</sup>	Powierzchnia dna m <sup>2</sup>
	średnica	wysokość	przy dnie	przy górnej krawędzi			
32000	51,9	18,0	19	7	0,0001 0,0004	2940	2700
50000	64,8	18,0	24	10	0,0002 0,0004	3660	3300
100000	84,0	20,0	30	10	0,0001 0,0004	5280	5540

Zbiorników o pojemności 32000 i 50000 m<sup>3</sup> jest w Polsce wiele. W Europie wybudowano już sporo zbiorników o pojemności 100000 i 125000 m<sup>3</sup>. W Japonii od lat są eksploatowane zbiorniki o pojemności przekraczającej 250000 m<sup>3</sup>; średnica takiego zbiornika ma ponad 100 m.

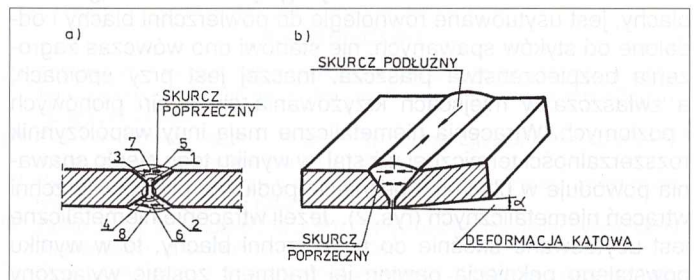
### Przyczyny powstania imperfekcji stalowych zbiorników walcowych

Imperfekcje głównego elementu konstrukcji zbiornika – płaszczu – wynikają ze sposobu wykonania tego cienkościennego elementu o wyjątkowo dużej powierzchni (por. tabl. 1).

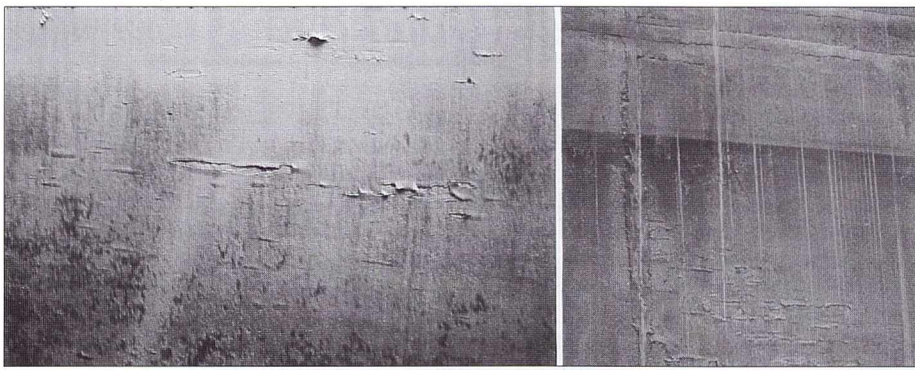
Płaszczu zbiorników wykonuje się z blach o wymiarach od 1,50 × 6,0 do 3,0 × 9,0 m, czyli odpowiednio o powierzchni od 9,0 do 27 m<sup>2</sup>. Blachy te mają krzywiznę nadawaną na walcach w wytwórni i następnie są transportowane na plac budowy. Oczywiście im większe wymiary blachy, tym mniejsza długość połączeń spawanych koniecznych do wykonania na placu budowy, ale równocześnie zwiększone zużycie stali, gdyż przekrój pionowy płaszczu jest mniej dostosowany do zmieniającego się, po obrysie trójkąta, parcia hydrostatycznego cieczy magazynowanej w zbiorniku. Blachy o dużych wymiarach są również bar-

dziej podatne na odkształcenia podczas transportu i przemierzania ich na placu budowy. Tak więc decyzja o doborze wymiarów blach, z których tworzy się płaszcz zbiornika, powinna zapaść w wyniku analizy uwzględniającej zarówno korzyści ze zmniejszenia zakresu robót spawalniczych, jak i straty wynikające ze zwiększenia zużycia stali na płaszcz [1]. Istotnym elementem decyzyjnym jest także sposób transportu i technologia montażu na budowie. Określając dokładnie wymiary blach, należy brać także pod uwagę, że końcówki arkuszy blach mogą mieć inną, na ogół mniejszą, krzywiznę niż środkowa część arkusza. Walcowanie końcówek blach jest szczególnie trudne i mniej wyspecjalizowane wytwórnie nie zawsze radzą sobie dobrze z tym problemem. W przypadku źle wywalcowanych końcówek blach w miejscach styków pionowych występują kątowne załamania walcowej powierzchni płaszczu. Renomowane wytwórnie konstrukcji stalowych przy walcowaniu końcówek blach zmieniają odpowiednio rozstawy walców lub wręcz obcinają niedowalcowane końcowe fragmenty arkuszy. To drugie rozwiązanie, jakkolwiek skuteczne, jest zdecydowanie nieekonomiczne.

Następnym źródłem imperfekcji płaszczu zbiornika walcowego jest wykonawstwo spoin. Wykonanie każdej spoiny czołowej, a także stosuje się przy łączeniu blach płaszczu zbiornika, wywołuje odkształcenie kątowne oraz skurcz poprzeczny i podłużny. Odkształcenie kątowne jest związane ze sposobem ukosowania brzegów blach do spawania (rys. 1). Najmniejsza deformacja kątowna powstaje przy spawaniu złączy symetrycznych, tj. ukosowanych na X, największa przy spawaniu złączy niesymetrycznych – ukosowanych na V. W płaszczach zbiorników stosuje się z reguły ukosowanie brzegów blach na X, a kolejne ściegi spoin wykonuje się na przemian od strony zewnętrznej płaszczu i od strony wewnętrznej. Każdy z tych ściegów wywołuje odkształcenie kątowne, które powinno być zrekomensowane przez odkształcenie towarzyszące wykonaniu następnego ściegu po przeciwnej stronie płaszczu. Nie zawsze to jednak się udaje i wówczas na stykach spawanych występują załamania kątowne. Z wymienionych poprzednio skurczy spoin czołowych: poprzecznego i podłużnego szczególne znaczenie przy budowie zbiorników walcowych ma skurcz poprzeczny, wpływa on bowiem na zmniejszenie obwodu płaszczu. Wartość tego skurczu zależy od grubości styku i technologii jego wykonania. Wartość skurczu poprzecznego spoin pionowych podano w tabl. 2 dla dwóch zbiorników o dużych pojemnościach, których płaszczu



Rys. 1. Odkształcenia złączy spawanych: a) złącze czołowe blachy ukosowane symetrycznie, b) złącze czołowe blachy ukosowane niesymetrycznie; 1-8 – kolejność wykonywania warstw spoiny



Rys. 2. Zewnętrzne objawy rozwarstwienia blachy płaszczu zbiornika: w środkowej części arkusza (z lewej) i w narożniku pomiędzy spoiną pionową i poziomą

wykonano z blach o długości 9,0 m. Skurcz ten należy uwzględnić zarówno w technologii spawania, tj. kolejności wykonywania styków pionowych i obwodowych, jak i przy wyznaczaniu długości blach płaszczu. Blacha zamykająca pierścień płaszczu musi mieć nadatek długości, gdyż przy jego braku powstanie szczelina w styku blach montowanych jako pierwsza i ostatnia w każdym pierścieniu. Oczywiście blachy muszą być scalane w pierścieniu z zastosowaniem takich złączy montażowych, które umożliwią niewielki przesuw blach pod wpływem działającego na nie skurczu poprzecznego.

Kolejną przyczyną deformacji płaszczu zbiornika jest jego osiadanie. Dotychczas najczęściej zbiorniki cylindryczne posadawiano na fundamentach piaskowych. Wykonanie płytowych fundamentów żelbetonowych jest bowiem bardzo drogie przy dużych powierzchniach den współczesnych walcowych zbiorników stalowych (por. tabl. 1).

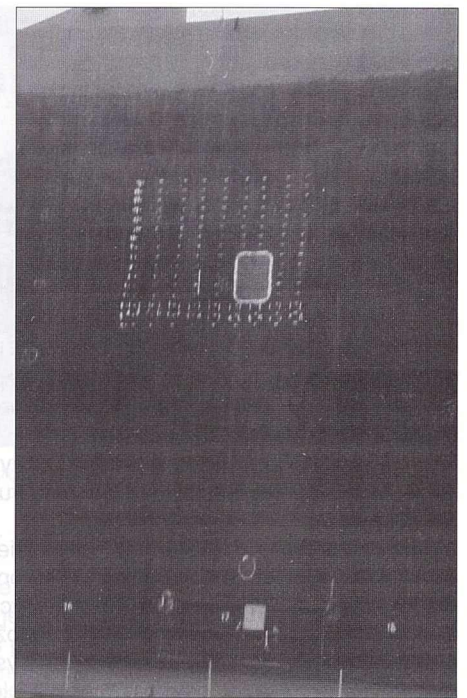
Tablica 2

Zmniejszenie obwodu płaszczu zbiornika w wyniku skurczu poprzecznego spoin pionowych

Nominalna pojemność zbiornika m <sup>3</sup>	Liczba blach na obwodzie płaszczu	Grubość blachy u dołu płaszczu mm	Skurcz poprzeczny jednej spoiny pionowej mm	Skurcz całkowity na obwodzie płaszczu mm
50 000	23	24	2,25	51,75
100 000	30	30	3,00	90,00

Jeżeli piaskowy fundament zbiornika nie będzie jednakowo zagęszczony, to na odcinkach obwodu, na których płaszcz osiadzie więcej niż na sąsiednich odcinkach, powstanie lokalne wychylenie płaszczu do wnętrza zbiornika.

Wymienione dotychczas imperfekcje miały charakter postaciowy, jednak w płaszczu zbiornika jest także wiele imperfekcji związanych ze strukturą i właściwościami samego materiału. W blachach spotykamy się niejednokrotnie z tak zwanymi zawalcowaniami, tj. rozwalcowanymi wtrąceniami niemetalicznymi w stali. Jeżeli zawalcowanie występuje w środku grubości blachy, jest usytuowane równoległe do powierzchni blachy i oddalone od styków spawanych, nie stanowi ono wówczas zagrożenia bezpieczeństwa płaszczu. Inaczej jest przy spoinach, a zwłaszcza w miejscach krzyżowania się spoin pionowych i poziomych. Wtrącenia niemetaliczne mają inny współczynnik rozszerzalności termicznej niż stal, w wyniku tego ciepło spawania powoduje w blachach pęknięcia podłużne przy powierzchni wtrąceń niemetalicznych (rys. 2). Jeżeli wtrącenie niemetaliczne jest usytuowane ukośnie do powierzchni blachy, to w wyniku powstałego pęknięcia pewien jej fragment zostaje wyłączony z pracy, należy więc go wyciąć i zastąpić blachą bez wad hutniczych (rys. 3). Powierzchnia występowania rozwarstwienia powinna być dokładnie określona badaniami ultradźwiękowymi.



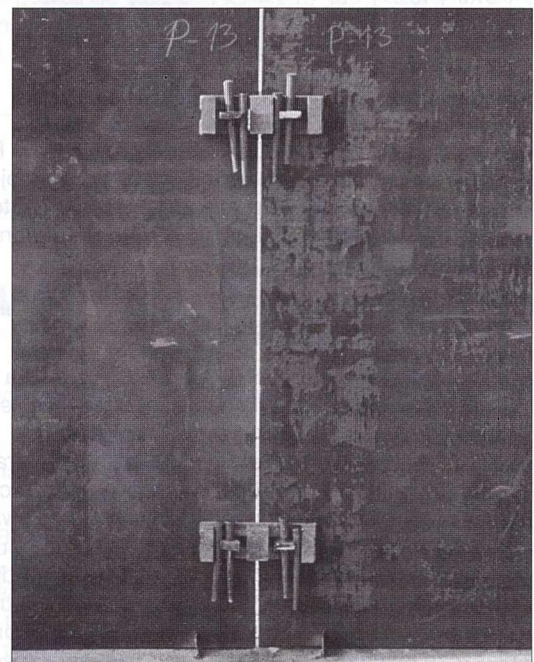
Rys. 3. Wycięty fragment blachy, w której stwierdzono rozwarstwienie

### Sposoby ograniczania imperfekcji stalowych zbiorników walcowych

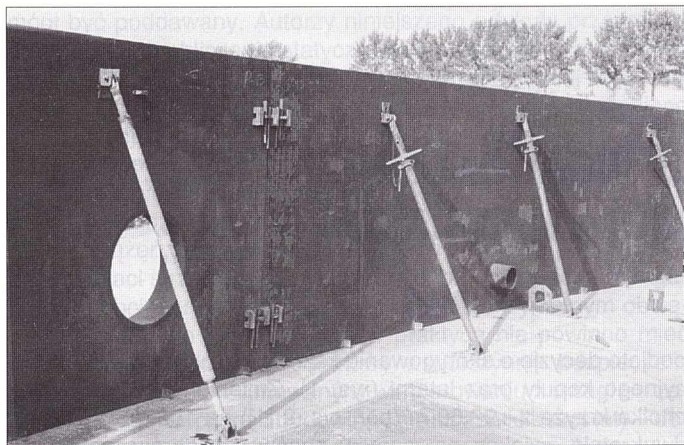
Przyczyny powstawania i sposoby ograniczenia imperfekcji płaszczu zbiornika walcowego są zróżnicowane.

Imperfekcje kształtu blach, z których tworzy się płaszcz zbiornika, powinny być stwierdzone przez nadzór techniczny budowy. Blachy nadające się do naprawy należy naprawić, inne – z imperfekcjami niemożliwymi do naprawy – odrzucić. Największe imperfekcje kształtu płaszczu powstają jednak w wyniku niefachowo prowadzonych prac montażowych i spawalniczych.

Zalecenia prawidłowych technologii tych robót, ujęte najbardziej skrótowo, sprowadzają się do poniższych uwag. W poszczególnych pasach płaszczu najpierw należy wykonać wszy-



Rys. 4. Uchwyt montażowy do zestawiania do spawania styków pionowych w płaszczu zbiornika



Rys. 5. Podpory o regulowanej długości podtrzymujące blachy pierwszego pierścienia płaszczu do czasu zespawania styków

stkie styki pionowe i dopiero wówczas można połączyć dwa pasy spoinami poziomymi. Blachy powinny być łączone do spawania uchwytnymi montażowymi, które dzięki zastosowaniu klinów pozwalają zarówno na regulację rozstawu pomiędzy krawędziami blach, jak i zapewniają rozładowanie skurczu spawalniczego przez przemieszczenie się blach (rys. 4).

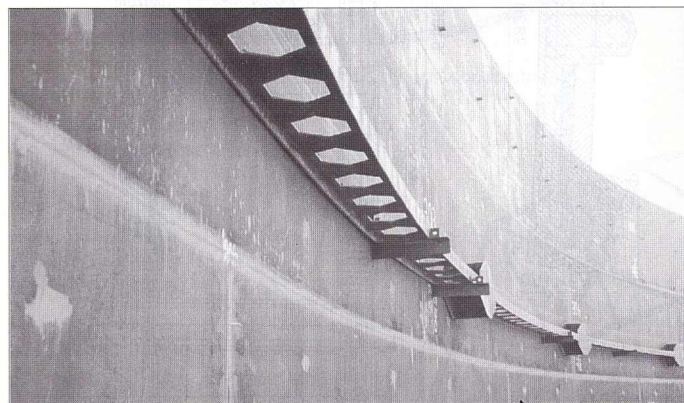
Niezmierznie ważna jest możliwość regulacji usytuowania blachy w pionie, zwłaszcza w najniższym pasie płaszczu, który stanowi bazę dla budowy całego zbiornika. Dlatego blachy najniższego pasa przed spawaniem utrzymuje się w pionie zastrzałami o regulowanej długości (rys. 5).

Przy wykonaniu następnych pasów blach płaszczu prawidłowy ich kształt uzyskuje się stosując zarówno podpory pionowe, jak i pierścienie montażowe wyprofilowane na dokładny promień płaszczu zbiornika (rys. 6). Pierścienie montażowe zostają usunięte dopiero wówczas, gdy górna krawędź płaszczu uzyska usztywnienie konstrukcją dachu stałego lub pierścieniem wiatrowym, gdy zbiornik ma dach pływający.

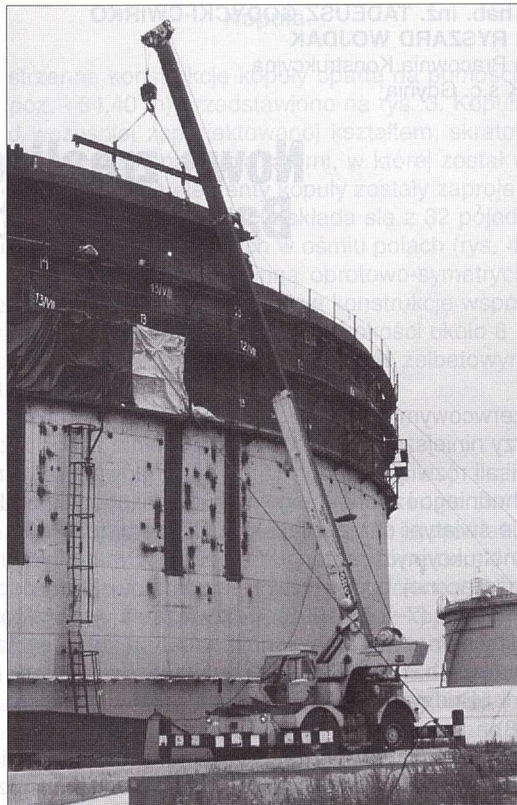
Spawanie zbiornika należy wykonać dokładnie według projektu technologii spawania. Na ewentualne usterki należy reagować bezpośrednio po ich stwierdzeniu. Brak takiej reakcji prowadzi do narastania imperfekcji, które później trudno jest usunąć.

Na rysunku 7 pokazano przypadek krańcowy. Zbiornik o pojemności 50 000 m<sup>3</sup> miał tak duże deformacje w górnej części płaszczu, że płaszcz należało zdemontować do połowy wysokości, a w dolnej jego części wyciąć na obwodzie 8 prostokątnych pasów i po rozchyleniu blach linami zastąpić te „prostokąty” klinami o trapezowym kształcie.

Wycinanie spoin ze stwierdzonymi defektami albo fragmentów blach z rozwarstwieniami wymaga wyjątkowo fachowego działania. Przy cięciu i ponownym spawaniu nagrzewa się bowiem lokalnie mały fragment blachy, który na ogół ma ograniczone możliwości swobodnego skurczu termicznego na skutek



Rys. 6. Pierścień montażowy stosowany w celu zapewnienia prawidłowego kształtu płaszczu zbiornika



Rys. 7. Naprawa płaszczu zbiornika o pojemności 50 000 m<sup>3</sup> (opis w tekście)

wkomponowania tego fragmentu w zamontowaną już część płaszczu mającą określoną sztywność. W tych warunkach naprężenia spawalnicze mogą spowodować deformacje kształtu, których przed naprawą spoin nie było.

Usuwanie deformacji kształtu płaszczu spowodowanych nierównomiernym jego osiadaniami wymaga najczęściej unoszenia fragmentów obwodu płaszczu przy zastosowaniu dźwigników hydraulicznych i uzupełnieniu górnej warstwy fundamentu zagęszczonym piaskiem lub torkretem. Jest to więc działanie bardzo trudne i pracochłonne. Technologia takiej naprawy zbiornika o pojemności 10 000 m<sup>3</sup> jest omówiona w [2, 3].

Reasumując, najskuteczniejszym sposobem przeciwdziałania imperfekcjom jest stosowanie prawidłowej technologii budowy zbiornika, w której imperfekcje zostaną sprowadzone do technicznie dopuszczalnych wartości.

Osobnym tematem są imperfekcje kształtu zbiornika spowodowane błędami poczynionymi podczas jego eksploatacji. Jeżeli w zbiorniku z dachem stałym doprowadzi się do powstania w jego wnętrzu podciśnienia, to deformacje wystąpią na dachu lub na płaszczu zależy, który z tych elementów konstrukcyjnych jest w danym zbiorniku słabszy. W zależności od stopnia zdeformowania zbiornika wskutek podciśnienia, jego naprawa może wymagać wymiany nawet dużych fragmentów konstrukcji. Naprawy zbiorników uszkodzonych przez podciśnienie omówiono w [4, 5, 6].

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Kowalski D.: Ocena kosztów wykonania cylindrycznego zbiornika na paliwa w zależności od gatunków stali i wymiarów blach. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 7/1997.
- [2] Ziółko J.: Korekta kształtu płaszczu cylindrycznego zbiornika stalowego. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 11/1992.
- [3] Ziółko J.: Instandsetzung am verformten Mantel eines zylindrischen Stahlbehälters. „Stahlbau”, nr 6/1993.
- [4] Ziółko J.: Die Instandsetzung durch Unterdruck beschädigter zylindrischer Stahlbehälter. „Der Stahlbau”, nr 11/1980.
- [5] Ziółko J.: Korekta kształtu płaszczu stalowych zbiorników cylindrycznych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 9/1992.
- [6] Ziółko J., Supernak E., Borek P., Jędrzejewski M.: Naprawa zbiorników cylindrycznych uszkodzonych wskutek podciśnienia „Inżynieria i Budownictwo”, nr 7/1997.