

Paweł FABIŚ

## ZBIORNIKI PRZEZNACZONE DO MAGAZYNOWANIA ALTERNATYWNYCH PALIW GAZOWYCH – ANALIZA PLASTYCZNOŚCI BLACH STALOWYCH STOSOWANYCH DO WYTWARZANIA ZBIORNIKÓW LPG

**Streszczenie.** W opracowaniu przedstawiono analizę właściwości mechanicznych blach stalowych stosowanych do wytwarzania zbiorników do magazynowania płynnego propanu – butanu oraz ich wpływ na właściwości plastyczne zbiornika. Szczególną uwagę zwrócono na problem przyrostu objętości cieczy w funkcji użytego do produkcji materiału.

## CONTAINER SPARE TO THE STORAGED OF THE GAS FUELS – ANALYSIS OF THE STEEL PLASTIC USED TO PRODUCING

**Summary.** The paper presents analysis of the mechanical property steel used to producing of the LPG containers and their influence on the strength. Especially attention is paid to volume of the liquid growth in a function of the material used to the production.

### 1. WPROWADZENIE

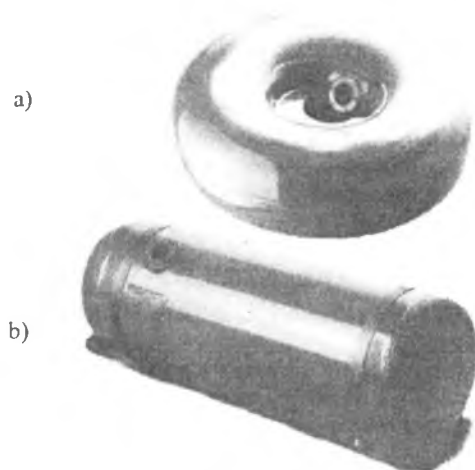
Powtarzające się od lat 70. ubiegłego stulecia mniejsze lub większe kryzysy paliwowe oraz będące ich konsekwencją podwyżki cen paliw, a także naciski obrońców środowiska naturalnego wymuszają na producentach i konsumentach poszukiwanie alternatywnych źródeł energii. Od początku lat 80. taką rolę zaczął pełnić gaz płynny propan i propan-butan (LPG - Liquefied Petroleum Gas), sprężony gaz ziemny (CNG-Compressed Natural Gas) oraz inne paliwa alternatywne. Pomimo iż LPG to produkt uboczny rafinacji ropy naftowej, a światowe zasoby gazu ziemnego są ogromne, to te paliwa w dalszym ciągu są w niewielkim zakresie wykorzystywane jako źródło energii do napędu pojazdów samochodowych.

Zalety, takie jak koszt oraz wysoka kaloryczność LPG, spowodowały, iż w przeciągu ostatnich 20 lat gaz ten stał się jednym z podstawowych paliw wykorzystywanych do celów grzewczych, technologicznych oraz w niektórych państwach europejskich (Włochy, Holandia czy Polska) jako alternatywne paliwo do samochodów osobowych.

Wraz ze wzrostem liczby pojazdów przystosowanych do zasilania tym paliwem pojawił się problem bezpieczeństwa eksploatacji, którego jednym z ważnych elementów jest bezpieczne przechowywanie paliwa gazowego w pojazdach.

### 1.1. Magazynowanie LPG

LPG jest paliwem magazynowanym w postaci ciekłej, gdyż mieszaninę propanu i butanu można łatwo skraplać. Przy ciśnieniu atmosferycznym i temperaturze normalnej gazy te znajdują się w stanie lotnym, lecz podniesienie ciśnienia od (0,2 – 1,0) MPa zapewnia ich przejście w stan ciekły. Ciśnienie skraplania zależy ściśle od temperatury otoczenia. Dlatego też magazynowanie tego paliwa w postaci skroplonej nie następuje większych problemów przyczyniając się do zwiększenia gęstości energii. Do magazynowania tych gazów są wykorzystywane zbiorniki ciśnieniowe. Większość stosowanych zbiorników ma kształt cylindryczny, jakkolwiek stosowane są również inne kształty, np. toroidalny (rysunek 1).



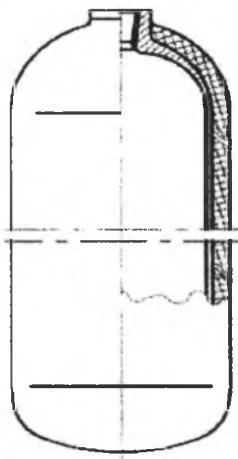
Rys. 1. Przykładowe kształty zbiorników do magazynowania LPG: a) toroidalny, b) cylindryczny  
Fig. 1. LPG container: a) toroidal, b) cylindrical

W pojazdach samochodowych stosowane są zbiorniki spełniające wymagania Regulaminu 67 poprawka 01 EKG ONZ [1], dopuszczane do eksploatacji przez inspektorów Transportowego Dozoru Technicznego. Zbiorniki te są wyposażone w odpowiadający ich homologacji osprzęt, który może występować jako zespolony lub rozdzielony. Nieodzownym wyposażeniem tego osprzętu jest zawór bezpieczeństwa (PRV) lub/i urządzenie zabezpieczające przed nadmiernym wzrostem ciśnienia (PRD). W rozwiązaniach konstrukcyjnych producentów włoskich funkcję urządzenia zabezpieczającego przed nadmiernym wzrostem ciśnienia spełniają bezpieczniki topikowe, czyli wkładki wykonane ze stopów metali o temperaturze topnienia równej  $120^{+10}$  °C. Zbiorniki przeznaczone do magazynowania LPG w pojazdach samochodowych są najczęściej wykonywane ze stali specjalnych, spełniających wymagania normy EN 10120 [2].

### 1.2. Zbiorniki do magazynowania CNG i LNG

Gaz ziemny (metan) jako paliwo do napędu pojazdów jest przechowywany w postaci gazowej, sprężony do ciśnienia 20 MPa lub jako gaz skroplony. Zbiorniki wykorzystywane do magazynowania sprężonego gazu muszą wykazywać wysoką odporność na rozerwanie oraz zmęczenie, ponieważ gaz wtłaczany jest do zbiornika pod wysokim ciśnieniem. Istotną cechą tych

zbiorników są takie parametry, jak ich objętość oraz masa własna. Stosunek tych parametrów jest istotnym wskaźnikiem porównawczym zbiorników wytwarzanych z różnych materiałów i przy wykorzystaniu różnych technologii. Wysokie ciśnienie przechowywania pozwala na 220-krotne zwiększenie gęstości magazynowanej energii (wyrażanej w kJ przypadających na jednostkę objętości). Przykładowy przekrój zbiornika przeznaczonego do magazynowania gazu ziemnego pod ciśnieniem 20 MPa pokazano na rys. 2. Stosunek masy zbiornika do jego objętości jest wysoki dla zbiorników wykonanych tradycyjnymi technologiami ze stali stopowych i niski dla butli wykonanych z materiałów kompozytowych.

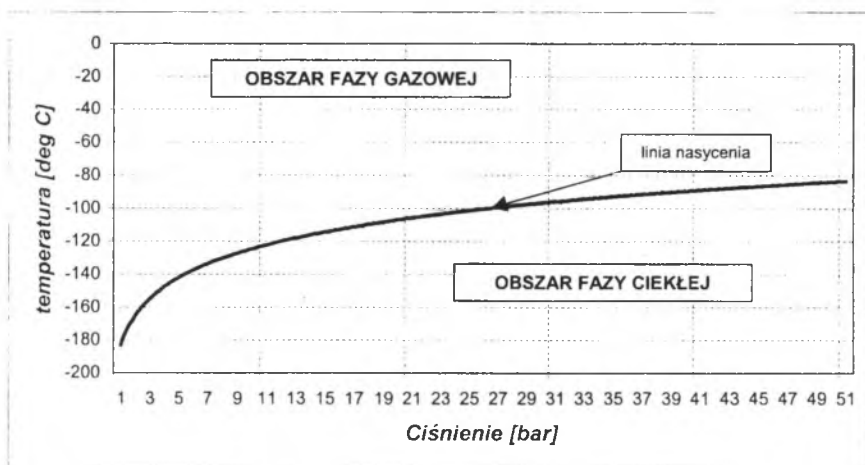


Rys. 2. Kompozytowy zbiornik CNG

Fig. 2. Composites CNG container

Zwiększenie gęstości energii poprzez sprężenie gazu ziemnego do ciśnienia 20 MPa pozwala 220-krotnie zwiększyć gęstość magazynowanej energii, nie zapewnia jednak uzyskania wskaźników gęstości zmagazynowanej energii paliw konwencjonalnych (paliwo benzynowe, olej napędowy). Dlatego też jednym z rozwiązań tego istotnego problemu może być skroplenie metanu (LNG – Liquefied Natural Gas). Osiąga się w ten sposób 580-krotne zwiększenie gęstości metanu w porównaniu do warunków normalnych. Skroplenie gazu następuje w wyniku obniżenia i utrzymania temperatury poniżej temperatury wrzenia (dla metanu temperatura wrzenia wynosi – 161,6 °C przy ciśnieniu 760 mmHg). Tak przygotowane paliwo przechowuje się w specjalnym zbiorniku kriogenicznym. Magazynowany w zbiorniku skroplony gaz ziemny jest nasyconą mieszaniną gaz-ciecz. Na rys. 3 przedstawiono linię nasycenia pozwalającą określić stan przejścia gazu ziemnego z fazy ciekłej w fazę gazową [3]. Przebieg linii nasycenia na tym wykresie wskazuje, że zwiększenie ciśnienia wewnątrz zbiornika pozwoli na podwyższenie temperatury, w której nastąpi przemiana fazowa.

W stosowanych zbiornikach LNG ciśnienie magazynowania wynosi 300 – 700 kPa [3]. Taka wartość ciśnienia powoduje podwyższenie temperatury wrzenia LNG (zgodnie z rys. 3). Podczas napełniania zbiornika pozostawia się ok. 10% wolnej przestrzeni w celu uniknięcia zwiększenia ciśnienia wewnątrz zbiornika w wyniku jego niezamierzonego podgrzania (np. pozostawienia pojazdu w miejscu silnie nasłonecznionym) [4].

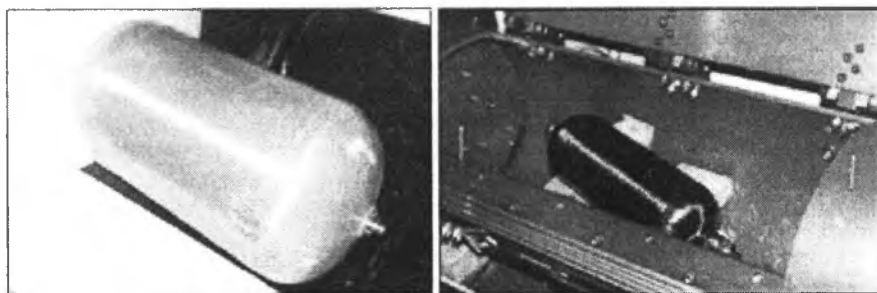


Rys. 3. Linia nasycenia dla metanu [5]

Fig. 3. The saturation curve for methan [5]

### 1.3. Materiały kompozytowe na zbiorniki

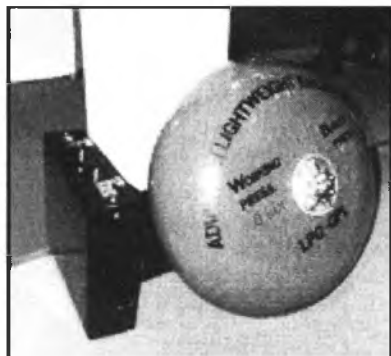
Jak wspomniano wcześniej, wadą zbiorników stalowych jest ich znaczna masa, stąd też aby poradzić sobie z tym problemem, rozpoczęto poszukiwania nowych materiałów mających zastąpić stale używane do produkcji tych zbiorników do magazynowania paliw alternatywnych. Obecnie największą uwagę zwraca się na zbiorniki kompozytowe. Kompozyty stosowane do produkcji takich właśnie zbiorników to przede wszystkim polimery wzmocnione włóknami ciągłymi, np. szklanymi, węglowymi lub aramidowymi (kevlar). Korzyści wynikające ze stosowania zbiorników kompozytowych najlepiej ilustruje [6], w której podano przykład samochodowego zbiornika CNG, którego masa, przy wykonaniu go ze stali, wynosiła 204 kg, ze stopu Al – 109 kg, a po zastosowaniu kompozytu tylko 59 kg. Przykładowy zbiornik wykonany z materiałów kompozytowych przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Zbiorniki kompozytowe (aramidowy i węglowy)

Fig. 4. Composites containers (aramid and carbon)

Rozpoczęto również produkcję zbiorników kompozytowych wykorzystywanych do magazynowania płynnego LPG. Przykład takiego zbiornika przedstawia rys. 5. Zbiornik ten wykonano w technice nawijania włókna szklanego na liner termoplastyczny. Charakteryzuje się on następującymi parametrami: ciśnienie robocze 8 barów, ciśnienie niszczące 80 barów, pojemność 57 dm<sup>3</sup>, waga 8,5 kg. Zbiornik pokryto warstwą kauczuku silikonowego w celu ochrony przed działaniem szkodliwych dla żywicznego spoiwa epoksydowego promieni ultrafioletowych [8].



Rys. 5. Kompozytowy zbiornik LPG

Fig. 5. Composites LPG container

## 2. STAŁE WYKORZYSTYWANE DO PRODUKCJI ZBIORNIKÓW MAGAZYNUJĄCYCH PŁYNNY PROPAN-BUTAN

Zbiorniki przeznaczone do magazynowania płynnego propanu-butanu muszą spełniać wymagania określone w Regulaminie 67 poprawka 01 [1]. Stąd też zasadnicze warunki wytrzymałościowe stawiane tym zbiornikom to przede wszystkim:

- wartość ciśnienia rozerwania zbiornika,
- miejsce i sposób rozerwania zbiornika,
- ilość wtłoczonej cieczy w czasie trwania próby hydraulicznego rozrywania.

Wartość ciśnienia rozerwania zbiornika określana podczas próby rozrywania nie może być niższa niż 6,75 MPa. Miejsce rozerwania natomiast powinno być zlokalizowane w materiale rodzimym zbiornika w dostatecznej odległości od spoin, a także strefy wpływu ciepła tych spoin. Przekrój miejsca rozerwania musi być jednorodny, wykazywać ciągłość bez przewężeń i wyrwań.

Ilość cieczy, którą powinien zmagażynować zbiornik, jest zależna od konstrukcji tego zbiornika i wynosi odpowiednio:

- dla zbiorników specjalnych, np. toroidalnych, wynosi min 8% objętości zbiornika,
- dla zbiorników cylindrycznych, w których długość całkowita zbiornika jest większa od jego średnicy, ilość wchłoniętej cieczy wynosi min 20% objętości tego zbiornika,
- dla zbiorników cylindrycznych, w których długość całkowita jest mniejsza od jego średnicy, ilość wtłoczonej do zbiornika w trakcie próby cieczy powinna wynosić co najmniej 17% objętości tego zbiornika.

Ilość cieczy włoczonej w trakcie próby na rozerwanie pod ciśnieniem hydraulicznym jest ściśle powiązana z właściwościami mechanicznymi użytego do wykonania zbiornika materiału, a w szczególności jego plastyczności. W tabeli 1 przedstawiono gatunki stali najczęściej używane do produkcji zbiorników oraz ich skład chemiczny i właściwości mechaniczne.

Tabela 1

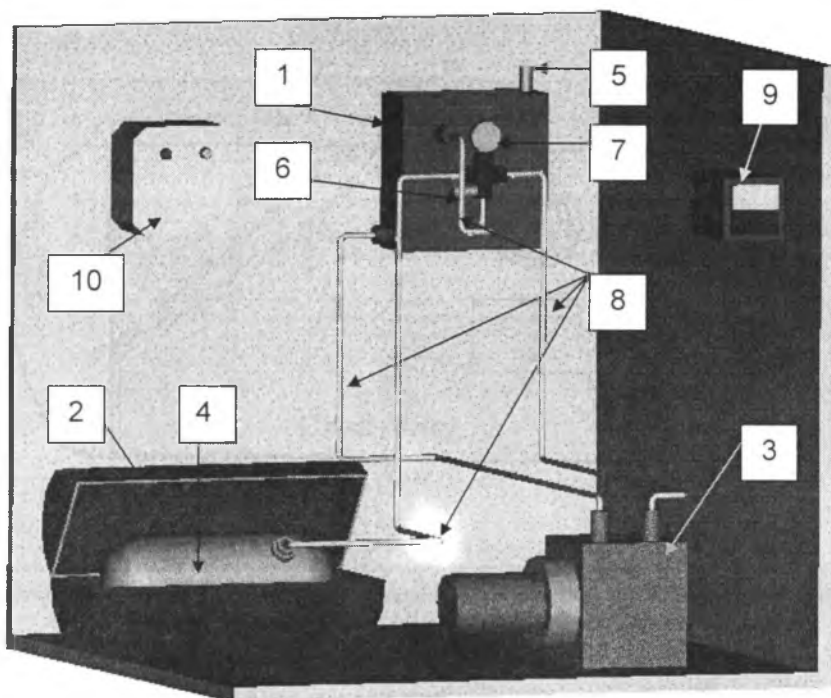
Stale najczęściej wykorzystywane do produkcji zbiorników LPG

Lp.	Gatunek stali	R <sub>e</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	Zawartości pierwiastków stopowych [%]					
				C [max]	Mn [min]	Si [max]	P [max]	S [max]	Al [min]
1	P 245 NB	314	450	0,151	0,0765	0,069	0,009	0,009	0,057
2	P 265 NB	274	403	0,08	0,76	0,02	0,017	0,009	0,04
3	St 52-3	391	510	0,13	1,142	0,18	0,013	0,016	0,033
4	St 44-3	343	446	0,15	0,48	0,09	0,017	0,012	0,04
5	P 355 NB	445	565	0,2	0,7	0,405	0,011	0,004	0,045
6	St 2 sp [GOST 380-88]	350	490	0,14	1,41	0,21	0,016	0,011	0,032
7	St 3 sp [GOST 380-88]	350	480	0,17	0,45	0,21	0,011	0,022	0,05

Skład chemiczny stali (tabela 1) określa poziom właściwości mechanicznych i istotnie oddziałuje na cechy użytkowe zbiorników, w tym na ilość włoczonej cieczy.

### 3. OBIEKTY BADAŃ I WYNIKI POMIARÓW

Badania na rozrywanie zbiorników pod ciśnieniem hydraulicznym były przeprowadzone na stanowisku, przedstawionym schematycznie na rys.6. Stanowisko jest wyposażone w pompę hydrauliczną z elektrycznym napędem, zbiornik pomiarowy z naniesioną podziałką ilości cieczy zmagazynowanej w jego wnętrzu oraz osłonę, w której umieszczany jest badany zbiornik. Pompa ma możliwość różnicowania wydatku tłoczonej cieczy w zależności od pojemności badanego zbiornika. Zmiany ciśnienia są rejestrowane dzięki przetwornikowi ciśnienia typu PC – 50 firmy Aplisens, natomiast pomiar poziomu cieczy w zbiorniku dokonywany jest przy użyciu przetwornika poziomu cieczy typu Sp – 50 również firmy Aplisens. Stanowisko wyposażone jest również w urządzenie rejestrujące zmiany ciśnienia i poziomu cieczy w funkcji czasu oraz umożliwia zdalne wyłączenie stanowiska po rozerwaniu badanego zbiornika.



Rys. 6. Stanowisko do badań hydraulicznego rozrywania zbiorników: 1 - zbiornik pomiarowy, 2 - osłona, 3 - pompa wody, 4 - badany zbiornik, 5 - przetwornik poziomu cieczy, 6 - przetwornik ciśnienia, 7 - manometr kontrolny, 8 - przewody elastyczne, 9 - rejestrator, 10 - szafka sterująca pompy wody

Fig. 6. Bench for burst tests under hydraulic pressure

Obiektami badań były zbiorniki, wykonane w tradycyjnej technologii, przeznaczone do magazynowania płynnego propanu-butanu, z dwóch zasadniczych grup konstrukcyjnych:

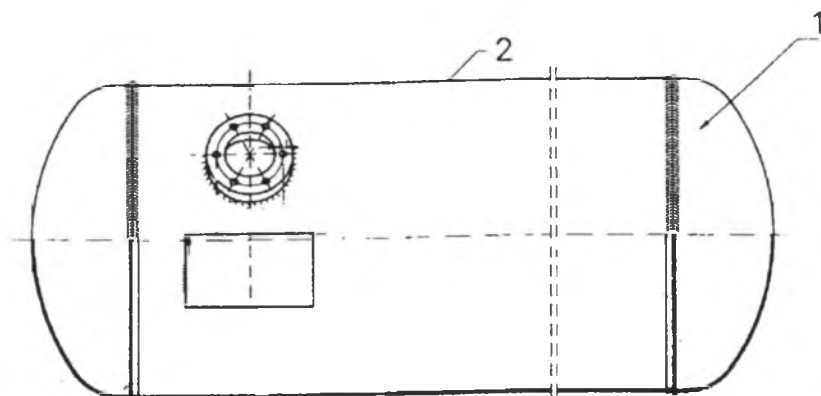
- ✓ zbiorniki cylindryczne,
- ✓ zbiorniki specjalne, toroidalne.

Badaniami objęto grupę 250 zbiorników, z której w ramach niniejszego opracowania wybrano do analizy 5 zbiorników cylindrycznych wykonanych z różnych materiałów oraz 3 zbiorniki toroidalne wykonane również z różnych materiałów spełniających wymagania normy EN 10210.

### 3.1. Wyniki badań i ich analiza

#### 3.1.1. Zbiorniki cylindryczne

Zbiorniki cylindryczne trzyczęściowe, tzn. takie, które są wytwarzane przez połączenie trzech elementów: dwóch dennic (w przypadku wszystkich badanych zbiorników są to dennice torosferyczne) oraz części cylindrycznej. Przykład konstrukcji takiego zbiornika przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Rysunek konstrukcyjny zbiornika cylindrycznego trzyczęściowego: 1 - dennica torosferyczna, 2 - cylindryczna część walcowa

Fig. 7. The drawing of the cylindrical container

W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań wszystkich zbiorników cylindrycznych wykonanych z różnych stali.

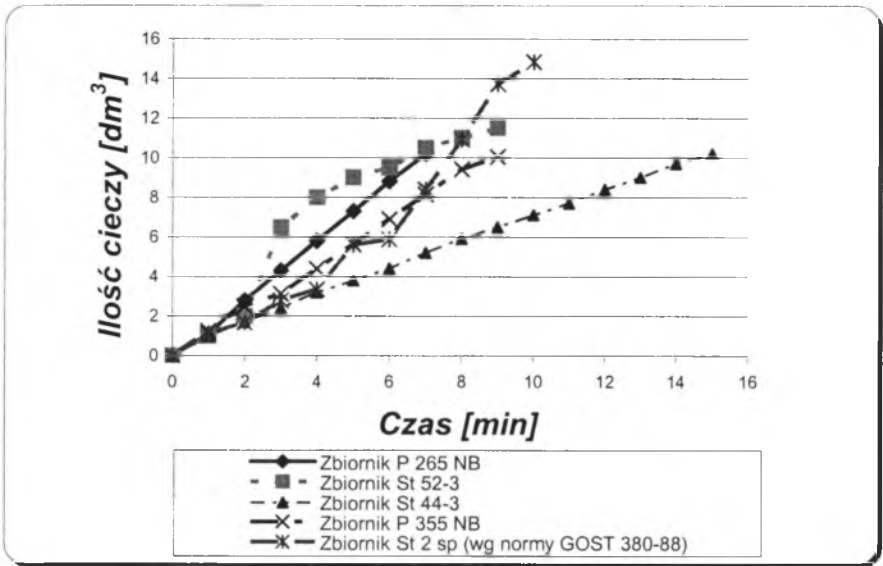
Tabela 2

Wyniki badań hydraulicznego rozrywania zbiorników

Zbiornik	Gatunek stali	Objętość zbiornika [dm <sup>3</sup> ]	Czas trwania próby [min]	Ciśnienie rozerwania [MPa]	Przyrost objętości [dm <sup>3</sup> ]	Przyrost objętości [%]
Zbiornik 1	P 265 NB	54	7	10,8	10,2	21,06
Zbiornik 2	St 52-3	50	17	10,7	11,5	23
Zbiornik 3	St 44-3	50	15	7,4	10,5	21
Zbiornik 4	P 355 NB	50	8,4	12,9	10,4	20,8
Zbiornik 5	St 2 sp	50	18	7,9	14,83	26,5

Na rysunku 8 przedstawiono zbiorczy wykres dla wszystkich zbiorników, na którym naniesione zostały krzywe obrazujące ilość cieczy włoczonej do zbiornika.



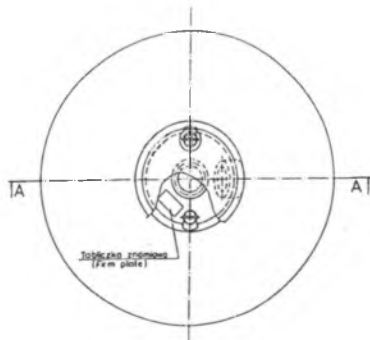
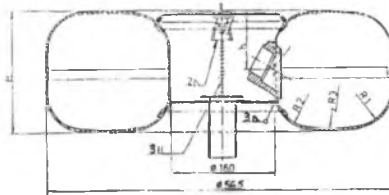


Rys. 8. Przebiegi ilości wpompowanej cieczy dla zbiorników cylindrycznych

Fig. 8. Diagram of the quantity liquid pumped to the cylindrical container

## 3.1.2. Zbiorniki specjalne, toroidalne

A-A



Rys. 9. Zbiornik specjalny, toroidalny

Fig. 9. Toroidal container

Zbiorniki toroidalne to zbiorniki powstałe przez połączenie trzech elementów: kielicha wykonanego z rury oraz dwóch odpowiednio ukształtowanych dennic. Przykład takiej konstrukcji zbiornika przedstawiono na rys.9.

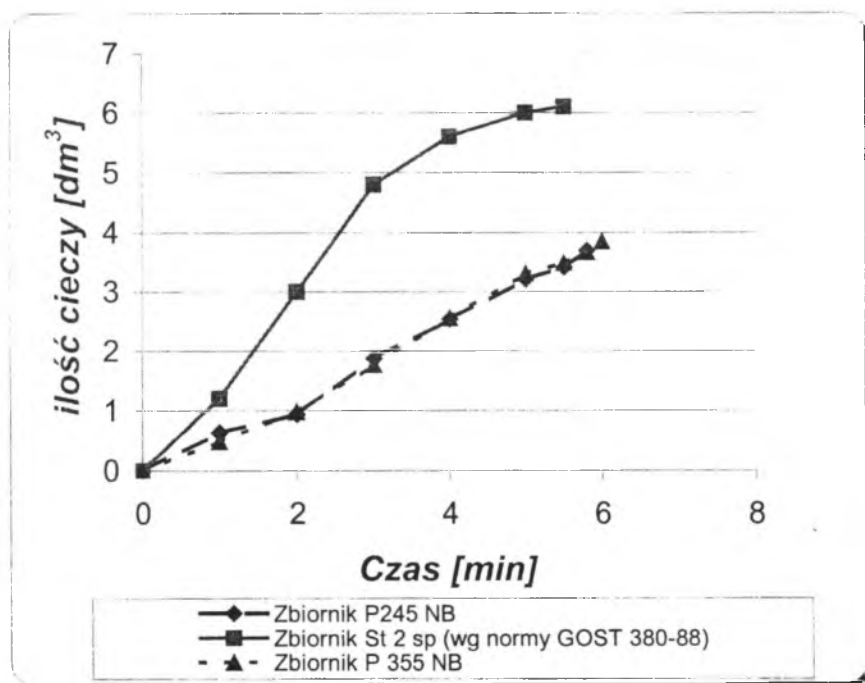
Wyniki badań hydraulicznych tych zbiorników zostały przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3

Wyniki badań hydraulicznych zbiorników specjalnych, toroidalnych

Zbiornik	Gatunek stali	Objętość zbiornika [dm <sup>3</sup> ]	Czas trwania próby [min]	Ciśnienie rozerwania [MPa]	Przyrost objętości [dm <sup>3</sup> ]	Przyrost objętości [%]
Zbiornik 1	P 355 NB	41,5	6	11,2	3,85	8,49
Zbiornik 2	St 2 sp	42	5	9,75	6,1	14,5
Zbiornik 3	P 245 NB	41	5,8	8,86	3,7	9,02

Poniżej na rysunku 10 przedstawiono objętość cieczy wtłoczonej do zbiorników w trakcie próby hydraulicznego rozrywania.



Rys. 10. Przebiegi ilości wpompowanej cieczy dla zbiorników toroidalnych

Fig. 10. Diagram of the quantity liquid pumped to the toroidal container

### 3.1.3. Wyniki badań mechanicznych

Z tej samej grupy zbiorników pobrano również próbki do badań mechanicznych, których celem było określenie granicy plastyczności  $R_e$ , wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  i wydłużenia. Uzyskane wyniki badań zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4

Właściwości mechaniczne stali badanych zbiorników

Rodzaj zbiornika	Stal	$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
cylindryczny	P 265 NB	285	442,9	33,8
	St 52-3	368	473	33,3
	St 44-3	260	445	31
	P 355 NB	351	527	26
	St 2 sp	384	410	38,9
toroidalny	P 355 NB	478	575	23
	St 2 sp	333	442	40
	P 245 NB	330	432	23

### 3.1.4. Analiza wyników

Uzyskane wyniki badań wskazały, że wszystkie badane zbiorniki spełniają kryteria zapisane w Regulaminie 67 poprawka 01, co daje możliwość wnioskowania o prawidłowym wykonaniu zbiorników właściwej technologii tłoczenia, spawaniu. Przeprowadzone w ramach badań próby rozrywania zbiorników pod ciśnieniem hydraulicznym nie pozwalają na bezpośrednie określenie właściwości mechanicznych materiału wykorzystanego do ich wytworzenia. Umożliwiają jednak ocenę poprawności jego doboru. Stwierdzono, że na ciśnienie rozerwania oraz objętość wtłoczonej cieczy wpływają między innymi: właściwości mechaniczne stali, technologia tłoczenia i spawania (umocnienie stali, naprężenia i odkształcenia spawalnicze).

Otrzymane wyniki badań dwóch różnych grup zbiorników nie mogą być ze sobą porównywane z powodu innych wymagań, jakie są stawiane tym zbiornikom [1]. Z rysunku 10 można odczytać, że dla zbiornika wykonanego ze stali St 2 sp (wg normy GOST 380-88) uzyskano najwyższą ilość wtłoczonej cieczy równą 14,83 dm<sup>3</sup>. 11,5 dm<sup>3</sup> odnotowano dla zbiornika wykonanego ze stali St 52-3, natomiast dla pozostałych zbiorników odnotowano porównywalne wyniki oscylujące w granicach 10,5 dm<sup>3</sup> (patrz tabela 2). W przypadku zbiorników toroidalnych największy przyrost ilości cieczy równy 6,1 dm<sup>3</sup> odnotowano dla zbiornika wykonanego również ze stali St 2 sp. Natomiast zbiorniki wykonane ze stali P 355 NB i P 245 NB osiągnęły porównywalne wyniki (tabela 3).

Należy także zwrócić uwagę na powtarzalność wyników, co wskazuje na prawidłową konstrukcję samego stanowiska wykonanego w Katedrze Budowy Pojazdów Politechniki Śląskiej. Stanowisko to spełnia wszelkie kryteria badań zbiorników w trakcie próby hydraulicznego rozrywania. Stanowisko zapewnia łatwość przeprowadzenia badań oraz zapewnia możliwość elektronicznej rejestracji przebiegu próby.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie analizy literatury oraz analizy wyników stwierdzono, że:

1. Stosowana w Katedrze Budowy Pojazdów metodyka badań zbiorników LPG dla nadania im znaku homologacji spełnia wszystkie wymagania Regulaminu 67 poprawka 01 i pozwala na obiektywną ocenę jakości produkowanych zbiorników.
2. Metodyka badań hydraulicznego rozrywania na stanowisku opracowanym w Katedrze Budowy Pojazdów Politechniki Śląskiej spełnia wymagania Regulaminu 67 poprawka 01 EKG [1].
3. Zbiorniki cylindryczne i toroidalne wykonane ze stali P 265 NB, St 52-3, St 44-3, P 355 NB, St 2 sp spełniają wymagania [1], w tym również wymagania tegoż regulaminu dotyczące kształtu zbiornika.
4. Największy przyrost objętości cieczy odnotowano w zbiornikach wykonanych ze stali St 2 sp, gdzie dla zbiornika cylindrycznego objętość wtłoczonej cieczy wynosi 26,5%, natomiast dla zbiornika toroidalnego wynosi 14,5%.
5. Zbiorniki przedstawione do badań spełniają wymagania dotyczące przyrostu objętości badanych zbiorników potwierdzając dobrą technologię ich wykonania.

#### Literatura

1. Regulamin 67 poprawka 01 Europejskiej Komisji Gospodarczej, <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs/67rv1am2e.pdf>
2. Flekiewicz M.: Samochodowe instalacje alternatywnego zasilania paliwami gazowymi. Materiały szkoleniowe Katedry Budowy Pojazdów, Katowice 2002.
3. Węgrzyn J.E., Litzke W.L.: Natural Gas as a fuel option for heavy vehicles. SAE Paper 1999-01-2248.
4. Chandler L.K.: Resource Guide for Heavy – Duty LNG Vehicles, Infrastructure and Support Operations. Final Raport for Brookhaven National Laboratory. March 2002.
5. Weaver Ch.S.: Natural Gas Vehicles – A review of the State of the Art. SAE Paper 892133.
6. Reservoirs en composites: un marche en developpment. Composites 1994, 3, 29-31.
7. Błażejowski W.: Technologia wykonania zbiorników CNG oraz normy dopuszczające. Konferencja Gaz ziemny w pojazdach. Dolnośląski Zakład Gazowniczy, Wrocław 27 września 2001, 51-66.
8. Błażejowski W., Kaleta J.: Kompozytowe zbiorniki paliw gazowych w pojazdach. VI Konferencja Silniki Gazowe 2003 Konstrukcja – Badania – Eksploatacja – Paliwa odnawialne, Częstochowa – Szczyrk 2-6 czerwca 2003, 81-92.

Recenzent: Dr hab. inż. Grzegorz Niewielski

#### Abstract

The paper presents analysis of the mechanical property steel used to producing of the LPG containers and their influence on the strength. The work is presentation method of the burst tests under hydraulic pressure of the LPG containers and their results and results of the mechanical tests.