

BADANIA NAPRĘŻEŃ WEWNĘTRZNYCH W KULISTYCH ZBIORNIKACH WYSOKOCIŚNIENIOWYCH METODĄ TENSOMETRYCZNĄ

Streszczenie: W artykule przedstawiono fragment procesu badania stanu technicznego raket po wieloletniej eksploatacji mającego na celu określenie możliwości ich dalszej eksploatacji po okresie gwarantowanym przez producenta, obejmujący badania naprężeń wewnętrznych w kulistych zbiornikach wysokociśnieniowych metodą tensometryczną. Omówiono przedmiot przeprowadzanych badań oraz zastosowane podczas badań procedury. Przedstawiono także wnioski z przeprowadzonych badań i analiz. Wykazano przydatność zastosowanych metod badawczych w procesie badania stanu technicznego elementów raket po wieloletniej eksploatacji.

Słowa kluczowe: przedłużanie okresu eksploatacji, naprężenie wewnętrzne, metoda tensometryczna

TESTING INTERNAL MATERIAL STRESS IN HIGH PRESSURE SPHERICAL CONTAINERS BY USING STRAIN GAUGE METHOD

Abstract: A part of technical status assessment process is presented in the paper dealing with the extension of service life time of missiles after expiring the warranty period and especially with testing internal material stresses of high pressure spherical containers by a strain gauge method. The subject of tests and applied procedures are described. Among some conclusions presented there is a main one that testing methods described in the paper are suitable for assessing the technical status of missiles subjected to long term storing.

Keywords: service time prolongation, internal material stress, strain gauge method,

1. Wstęp

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia od wielu lat w prowadzi badania mające na celu zapewnienie bezpiecznej eksploatacji środków bojowych oraz określenie możliwości przedłużenia okresu ich eksploatacji poza okres gwarantowany przez producenta. Między innymi prowadzone są badania długotrwale eksploatowanych wysokociśnieniowych zbiorników kulistych sprężonego powietrza, wykorzystywanych w raketach przeciwlotniczych klasy ziemia-powietrze oraz raketach woda-woda. Spełniają one rolę akumulatorów energii niezbędnej do zasilania pokładowych urządzeń i mechanizmów sterujących lotem rakiety. Podczas eksploatacji raket zbiorniki są stale napełnione lub wielokrotnie napełniane powietrzem o ciśnieniu dochodzącym do 40 MPa. Część zbiorników po napełnieniu powietrzem może przebywać kilka lat w warunkach, gdzie zmienna temperatura otoczenia powoduje wahania ciśnienia powietrza w ich wnętrzu. W związku z powyższym istnieje konieczność kontroli stanu technicznego zbiorników, jakości połączeń spawanych i gwintowych oraz sprawdzania, czy nie następuje degradacja materiału związana z wieloletnią eksploatacją, często w niekorzystnych warunkach klimatycznych.

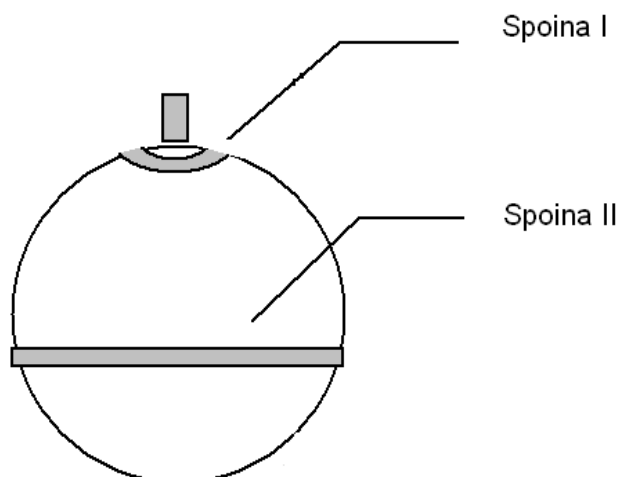
2. Cel badań

Wysokociśnieniowe, kuliste zbiorniki powietrza po wieloletniej eksploatacji jako podzespoły zagrażające bezpieczeństwu eksploatacji oraz mające istotne znaczenie dla prawidłowego funkcjonowania rakiety, poddawane są kompleksowym sprawdzeniom z wykorzystaniem wielu metod badawczych. Wykonywane są typowe badania materiałowe, symulacja pracy zbiornika i występowania miejsc koncentracji naprężeń metodą elementów skończonych (MES) oraz pomiar emisji akustycznej (EA) podczas prób ciśnieniowych. W celu zwiększenia wiarygodności uzyskiwanych wyników dodawane są kolejne metody badawcze. W bieżącym roku próby ciśnieniowe metodą emisji akustycznej rozszerzono o badania z wykorzystaniem tensometrów umieszczonych w okolicy spoin prostopadle i równoległe do nich.

3. Przedmiot badań

Przedmiotem badań był zbiornik wysokociśnieniowy wyprodukowany w 1976 roku oznaczony numerem 3. Zbiornik ma kształt kulisty i zbudowany jest z dwóch półkul połączonych ze sobą spoiną obwodową. Dodatkowo, każda z półkul posiadała spoinę króćców technologicznych. Średnica zbiornika wynosi 295 mm, grubość ścianki od 5,2 mm do 6,2 mm, pojemność zbiornika to 11,8 l. Szkic zbiornika przedstawiono na Rys.1.

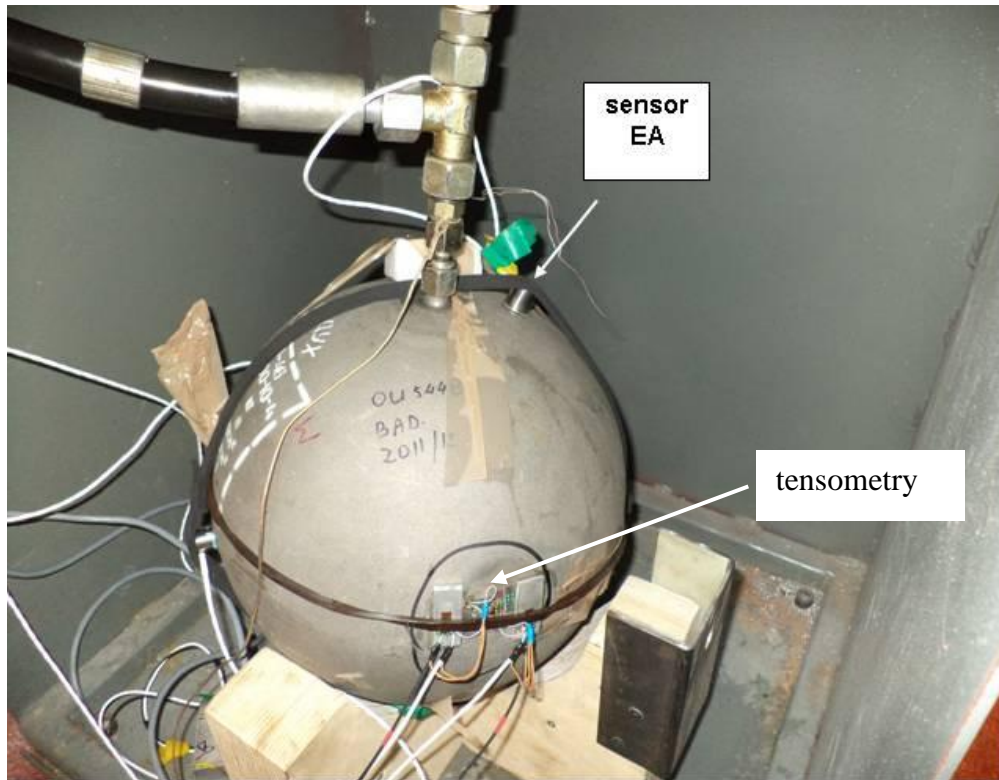
Dla tego typu zbiornika ciśnienie robocze wynosi 29,5 MPa, maksymalne ciśnienie 36,5 MPa i ciśnienie próby ma wartość 54,8 MPa.



Rys.1. Szkic usytuowania spoin w badanym zbiorniku

4. Przebieg i wyniki badań

Charakterystyki tensometrów, układów pomiarowych współpracujących z nimi oraz niezbędne wzory obliczeniowe zostały podane w [1]. W badaniach zastosowano tensometry foliowe typu TF3/120-W o oporności 120 omów, długości bazy pomiarowej równej 5,5 mm i stałej k równej 2,15, produkowanych przez firmę TEN MEX Łódź.



Fot.1. Sposób zamocowania sensora EA z dociskiem elastycznym na górze zbiornika tytanowego oraz widok naklejonych tensometrów w środkowej części zbiornika. Zbiornik znajduje się wewnątrz osłony bezpieczeństwa, wykonanej z blachy.

Tensometry przyklejano do oczyszczonej i odtuszczonej powierzchni zbiorników za pomocą profesjonalnego dwuskładnikowego kleju polimerowego Vishay Mbond AE10 sugerowanego przez producenta tensometrów, 24 godziny przed pomiarami. Po przyklejeniu tensometrów wygrzewano je przez 2 godziny powietrzem o temperaturze 60 stopni Celsjusza. Tensometry połączono ze specjalistycznymi polami kontaktowymi również przyklejonymi do zbiornika jak to pokazano na Fot.1 i Fot.3. Pola kontaktowe połączono z puszkami rezystorowymi przewodami ekranowanymi oraz przewodem o niskiej rezystancji łączącym wszystkie elementy pozostające na potencjale masy. Puszki rezystorowe posiadają z kolei wyprowadzony ekranowany przewód trójżyłowy transmitujący sygnał pomiarowy do mostka tensometrycznego. W układzie pomiarowym zaprojektowanym w IPPT PAN przewidziano 2 kanały pomiarowe. Ich dołączenie do mostka pomiarowego pokazano na Rys.2. Dwukanałowy układ pomiarowy składa się zatem z dwóch tensometrów pomiarowych, umieszczonych obok na płytkach aluminiowych dwóch tensometrów kompensacyjnych, dwóch puszek rezystorowych, okablowania i mostka tensometrycznego. Płytki pomiarowe z tensometrami zabezpieczono się przekładką izolacyjną a następnie dociśnięto do zbiornika za pomocą dyskowych magnesów neodymowych.

Niezbędna do przeprowadzenia poniższych pomiarów aparatura została przedstawiona na poniższej fotografii.

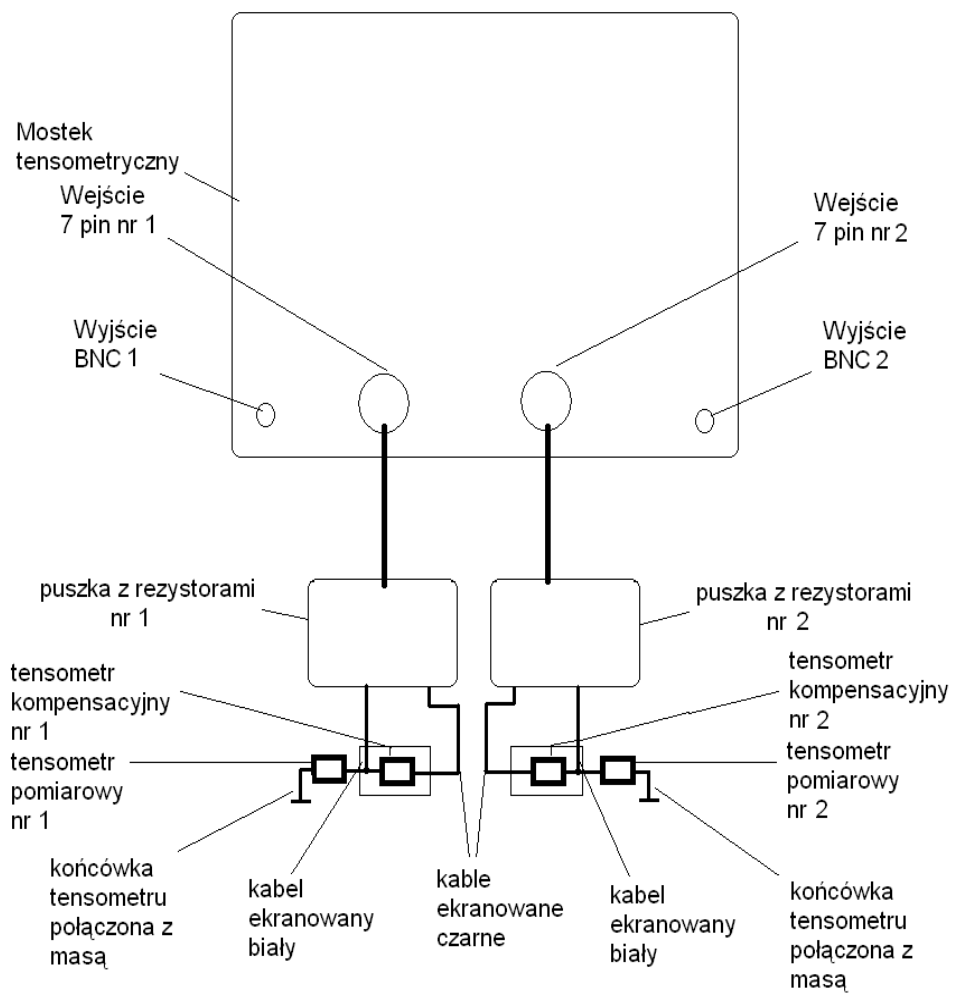


Fot.2. Trzykanałowa aparatura do pomiaru emisji akustycznej (z lewej strony) oraz dwukanałowy mostek tensometryczny (z prawej strony)

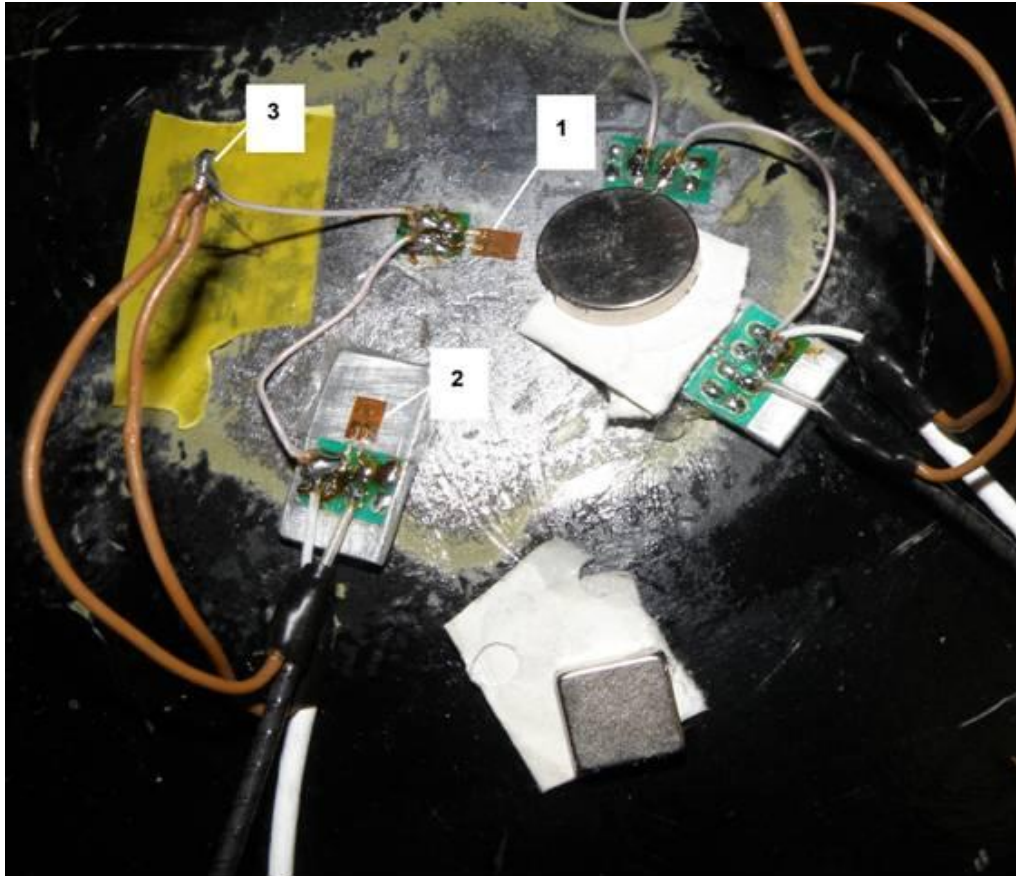
Wysokostabilny wzmacniacz mostka tensometrycznego miał ustawione wzmocnienie $\times 500$. Układ tensometrów zasilany jest napięciem 4,1 V. Napięcie to można regulować oddzielnie dla każdego z kanałów pomiarowych za pomocą potencjometrów wieloobrotowych oznaczonych literą „U” z przodu mostka tensometrycznego. Odpowiada to ustawieniu na skalach potencjometrów 780 działek. Badania wzorcujące wykazały, że przy takim ustawieniu 1 mV napięcia na wyjściach mostka odpowiada przemieszczeniu równym 1,3 mikrostraina, czyli $1,3 \cdot 10^{-6}$.

Wyjścia napięciowe mostka tensometrycznego połączono przewodami koncentrycznymi z wejściami nr 6 i 7 rozgałęźnika karty pomiarowej.

Pokazany na szkicu poniżej mostek tensometryczny jest wyposażony we wskaźnik napięcia wyjściowego wyskalowany w miliwoltach. Pod wskaźnikiem znajduje się przełącznik umożliwiający zmianę źródła napięcia (kanał I / kanał II).



Rys.2. Sposób połączenia kablami dwóch kanałów do pomiarów tensometrycznych odkształceń w badanych zbiornikach kulistych.



Fot.3. Widok okablowanych tensometrów i pól kontaktowych na powierzchni badanego zbiornika kulistego.

Oznaczenia:

- 1 - tensometr pomiarowy wraz z osobno przyklejonym polem kontaktowym,**
- 2 - tensometr kompensacyjny z polem kontaktowym (oba elementy przyklejone do płytki duralowej),**
- 3 - przewód łączący punkty pozostające na potencjale masy.**

Po zakończeniu łączenia okablowania przeprowadzono procedurę zerowania obu kanałów mostka. W tym celu do wyjść analogowych mostka dołączono woltomierze napięcia stałego o czułości nie gorszej niż 1 mV oraz wyregulowano napięcia na tych wyjściach do poziomu $0\text{ V} + 1\text{ mV}$ przy braku ciśnienia w badanym zbiorniku. Zerowania dokonano używając potencjometrów wielobrotowych umieszczonych z przodu mostka tensometrycznego i oznaczonych „0”. Po zakończeniu procedury zerowania jednokrotnie obciążono badany zbiornik do ciśnienia równego 10 MPa w celu stabilizacji połączenia klejowego z tensometrami oraz kalibracji torów pomiarowych.

4.1. Wyniki badań

Zbiornik został poddany pięciu próbom przy obciążeniu do ciśnienia 36,5 MPa oraz na końcu próbie z obciążeniem do ciśnienia 55 MPa. W trakcie czterech pierwszych prób rejestrowano sygnał z tensometrów umieszczonych 20 mm od spawu środkowego, a podczas dwóch ostatnich rejestrowano sygnał z tensometrów umieszczonych 20 mm od spawu położonego w górnej części zbiornika. Wyniki te zostały przedstawione na Rys.3 do 8.

Naprężenia w ścianie cienkościennego zbiornika kulistego w zależności od wewnętrznego ciśnienia hydrostatycznego p można wyznaczyć ze wzoru:

$$\sigma = (p D)/(4g) \quad (1)$$

gdzie:

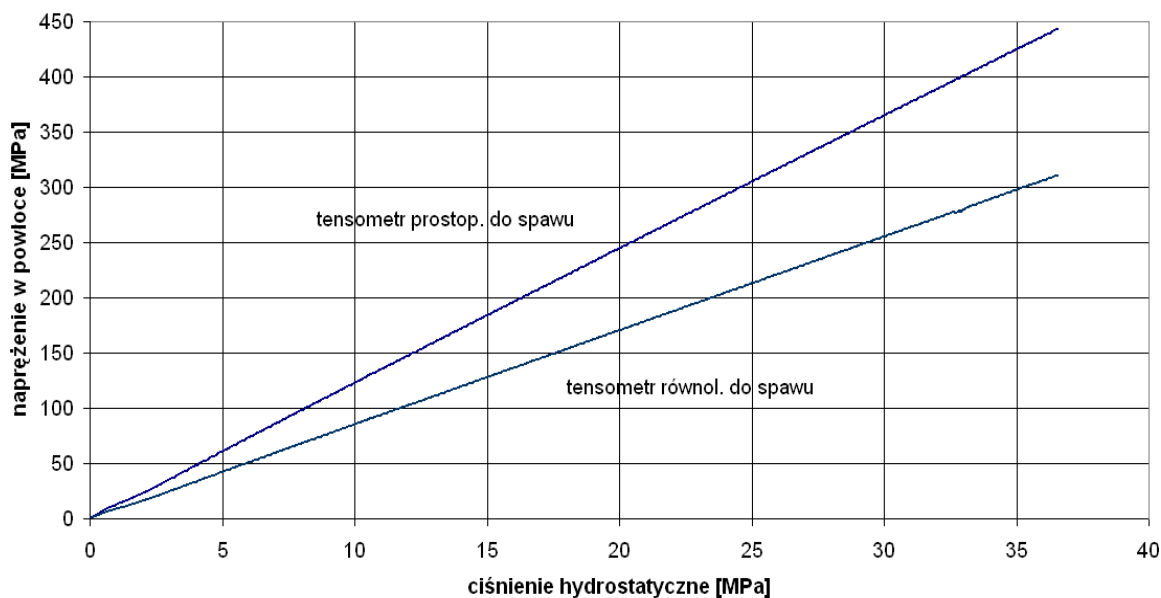
p – ciśnienie w zbiorniku,

D – średnica zewnętrzna zbiornika,

g – grubość ścianki zbiornika.

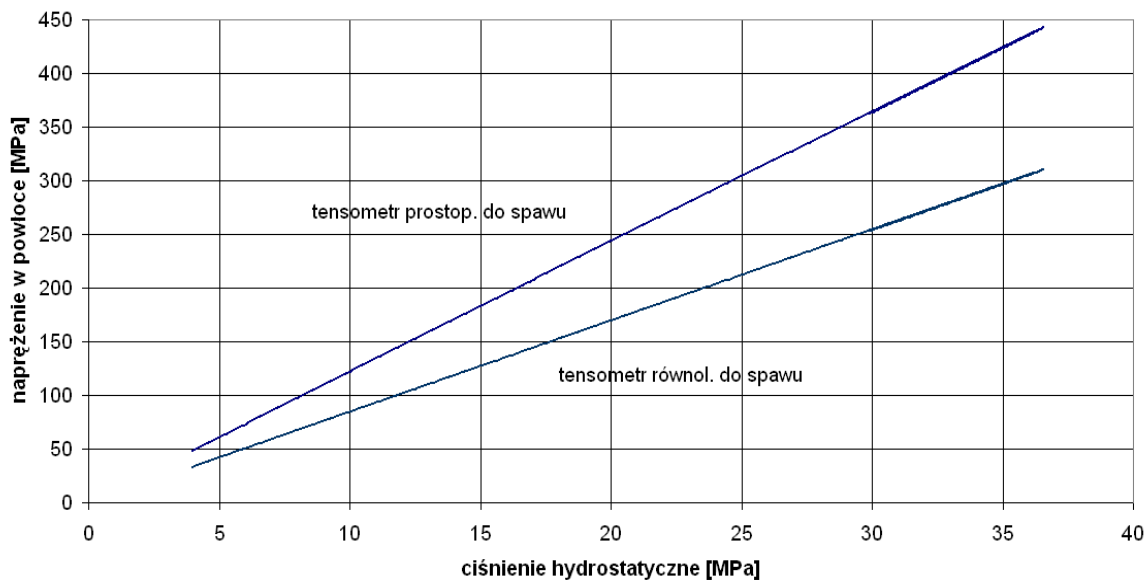
W przypadku badanego zbiornika w okolicy środkowej spoiny obwodowej oraz górnej spoiny, dla grubości ścianki zbiornika około 6 mm, naprężenie to jest w przybliżeniu 12 razy wyższe od przyłożonego ciśnienia hydrostatycznego i dla ciśnienia w zbiorniku 35MPa wynosiłoby 430 MPa, natomiast dla ciśnienia w zbiorniku 55 MPa wynosiłoby 660 MPa.

Wynik 1 próby ciśnieniowej, zbiornika nr 3, tensometry umieszczone równoległe i prostopadle do spawu 20 mm od spawu łączącego półkule



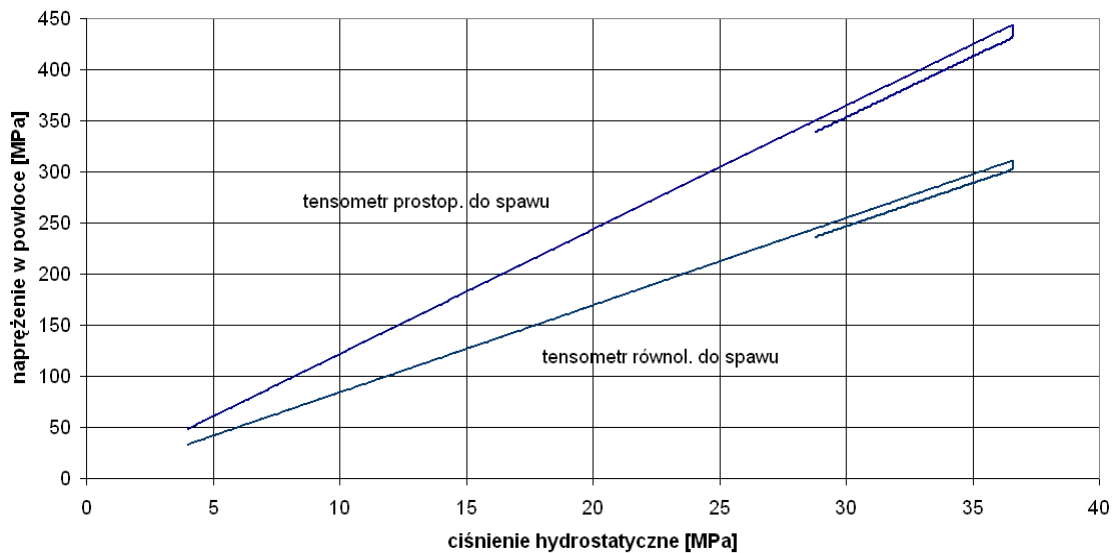
Rys.3. Wynik pierwszej próby ciśnieniowej, przeprowadzonej na zbiorniku nr 3.

Wynik 2 próby ciśnieniowej, zbiornika nr 3, tensometry umieszczone równoległe i prostopadłe do spawu 20 mm od spawu łączącego półkule



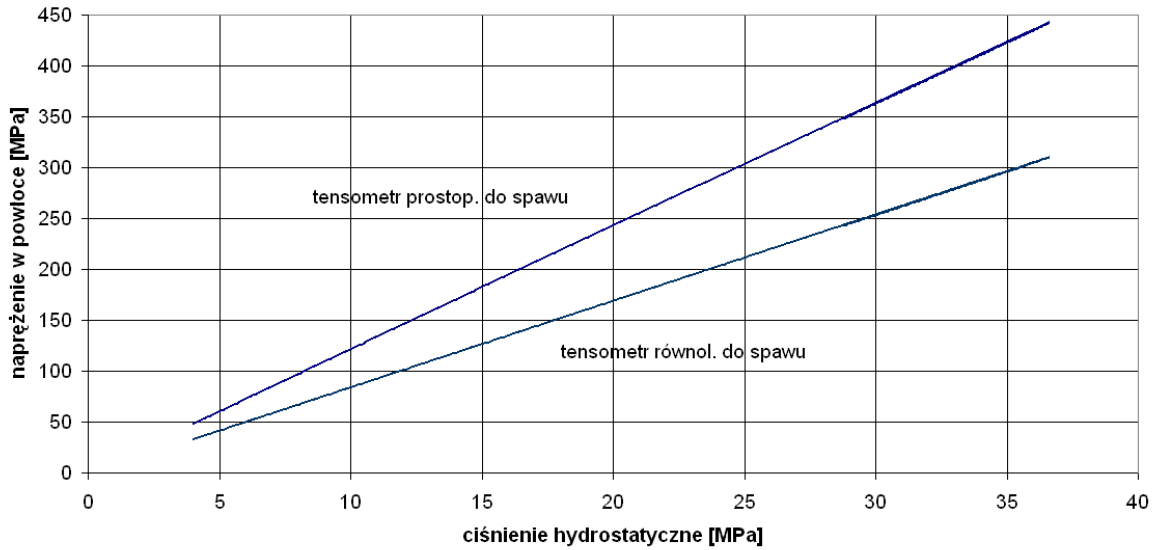
Rys. 4. Wynik drugiej próby ciśnieniowej, przeprowadzonej na zbiorniku nr 3. Uzyskano wartości naprężeń w powłoce podobne do wyznaczonych dla pierwszej próby.

Wynik 3 próby ciśnieniowej, zbiornika nr 3, tensometry umieszczone równoległe i prostopadłe do spawu 20 mm od spawu łączącego półkule



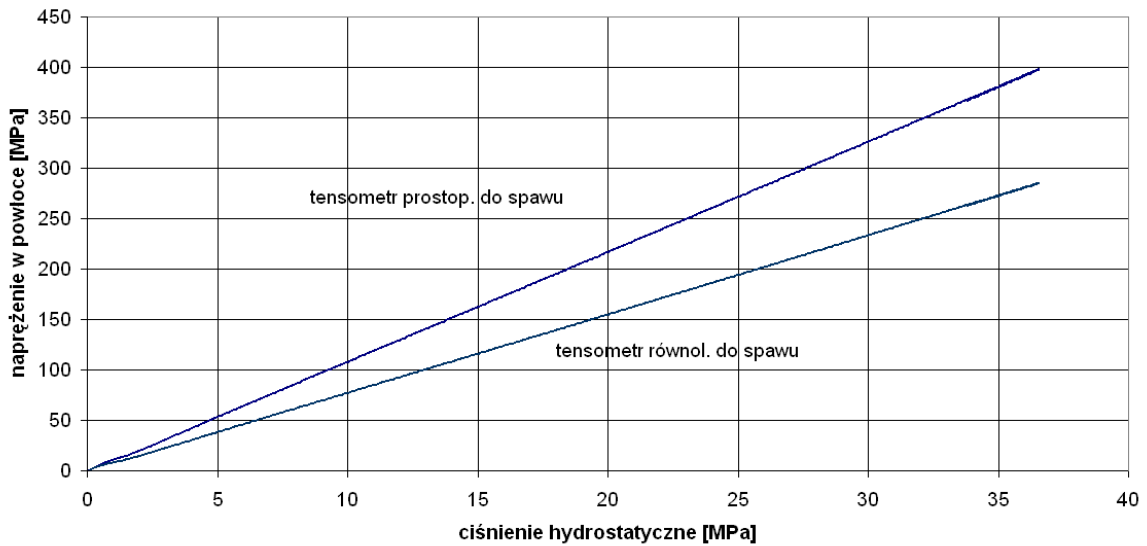
Rys. 5. Wynik trzeciej próby ciśnieniowej, przeprowadzonej na zbiorniku nr 3. Uzyskano wartości naprężeń w powłoce podobne do wyznaczonych dla prób poprzednich. Widoczne nieznaczne przemieszczenie tensometrów, które uległo kasacji w następnym cyklu.

Wynik 4 próby ciśnieniowej, zbiornika nr 3, tensometry umieszczone równoległe i prostopadłe do spawu 20 mm od spawu łączącego półkule



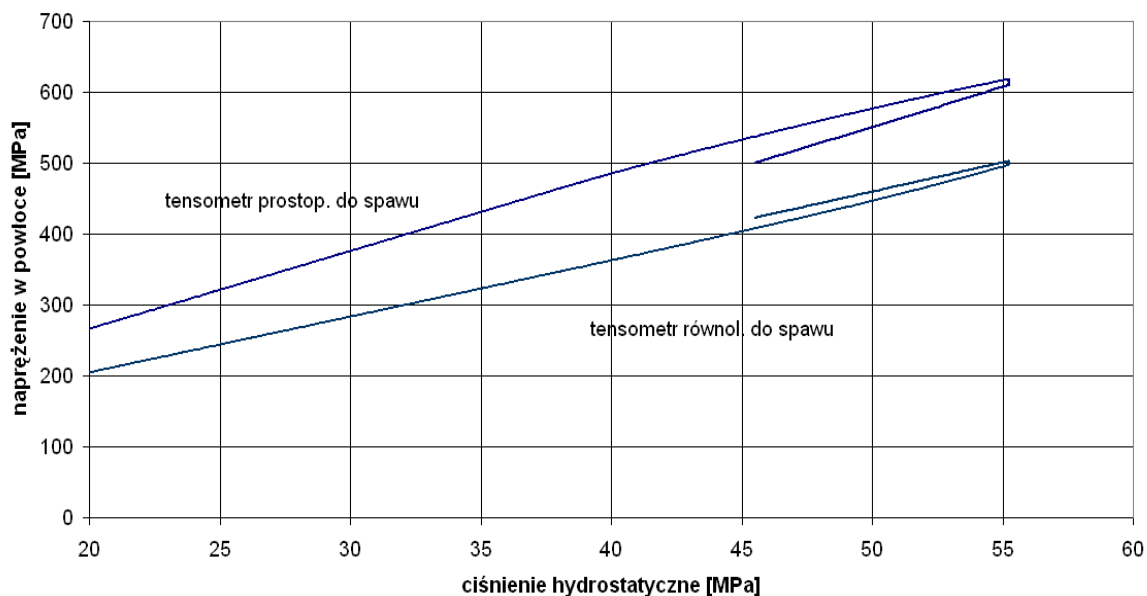
Rys. 6. Wynik czwartej próby ciśnieniowej. Wartości naprężeń w powłoce podobne do wyznaczonych dla prób poprzednich.

Wynik 5 próby ciśnieniowej, zbiornika nr 3, tensometry umieszczone równoległe i prostopadłe do spawu 20 mm od spawu w górnej części



Rys. 7. Wynik piątej próby ciśnieniowej, przeprowadzonej na zbiorniku nr 3. Pomiar wykonany za pomocą tensometrów umieszczonych w drugim położeniu. Uzyskano o kilka procent niższe wartości naprężeń w powłoce w porównaniu do wyznaczonych dla prób 1 do 4.

Wynik ostatniej próby ciśnieniowej, zbiornika nr 3, tensometry umieszczone równolegle i prostopadle do spawu 20 mm od spawu w górnej części



Rys. 8. Wynik próby ciśnieniowej, przeprowadzonej na zbiorniku nr 3 do ciśnienia 55 MPa.

5. Wnioski z badań

Naprężenia w materiale zbiornika zmieniają się od 266 MPa dla ciśnienia roboczego (29,5 MPa) poprzez 317-429 MPa dla maksymalnego ciśnienia roboczego (36,5 MPa) i dochodzą do wartości 495-615 MPa dla ciśnienia próby. Uzyskane wyniki pomiarów naprężenia w przypadku tensometrów umieszczonych prostopadle do spoiny obwodowej są zbliżone do wartości obliczonych ze wzoru (1). W związku ze zwiększeniem grubości ścianki zbiornika poprzez wykonanie spoiny, naprężenia zmierzone tensometrem równoległym do głównej spoiny obwodowej są około 20% mniejsze od naprężeń zmierzonych przez tensometr prostopadły do tej spoiny, co było do przewidzenia zgodnie ze wzorem (1)

Poddanie zbiorników różnorodnym wymuszeniom hydraulicznym: od ciśnienia roboczego (29,5 MPa), poprzez maksymalne ciśnienie robocze (36,5 MPa), do ciśnienia próby (54,8 MPa), z jednoczesnym pomiarem sygnałów emisji akustycznej oraz naprężeń w materiale zbiornika metodą tensometryczną wykazało brak sygnałów EA świadczących o obecności wad materiałowych i destrukcji zbiorników.

Przebieg prób i uzyskane wyniki potwierdziły przydatność metody tensometrycznej jako metody badawczej wysokociśnieniowych zbiorników kulistych powietrza.

Literatura

- [1] W. Tyburski, Przetworniki tensometryczne - konstrukcja, projektowanie, użytkowanie
- [2] Materiały archiwalne WITU- niepublikowane

- [3] IPPT PAN, Zakład Wytrzymałości Materiałów. „ Wykonanie badań materiałowych czterech zbiorników wysokociśnieniowych obciążonych wymuszeniami o różnych intensywnościach z zakresu 5-60 MPa.” Warszawa 2012 r
- [4] IPPT PAN, Zakład Wytrzymałości Materiałów. „ Udział w badaniach sygnałów EA i naprężeń wewnętrznych trzech zbiorników kulistych.” Warszawa 2012 r
- [5] Janusz Walczak: Wytrzymałość Materiałów, PWN, Warszawa 1954.
- [6] R. Kurowski, M.E. Niezgodziński: Wytrzymałość Materiałów, PWN, Warszawa 1955.

