

## BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE ZBIORNIKÓW NA SPREŻONE POWIETRZE

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań parametrów wytrzymałościowych materiału zbiorników powietrza rakiet 3M9ME. W pierwszej części zamieszczono wyniki analizy składu chemicznego materiału zbiorników oraz pomiarów sygnałów emisji akustycznej w czasie wytrzymałościowych prób hydraulicznych, przy zmianie ciśnienia od roboczego do ciśnienia próby. Po zakończeniu badań ciśnieniowych z materiału zbiorników wycięto odpowiednie próbki i poddano je statycznej próbie rozciągania.

Słowa kluczowe: emisja akustyczna, granica plastyczności, moduł Younga

## STRENGTH TESTING ON COMPRESSED AIR RESERVOIRS

**Abstract:** The results of testing strength characteristics on material of air reservoirs of 3M9ME rockets were introduced in the paper. The first part consists of the results of chemical analyses of the material of reservoirs and the measurements of acoustic emission signals at the hydraulic strength tests when the pressure changes from the rating level to the trial level. After ending the pressure tests some samples were cut out from the reservoirs and tensile strength tests were carried out on them.

Keywords: the acoustic emission, limit of plasticity, Young's modulus.

### 1. Wstęp

W związku z dobrym stanem technicznym eksploatowanych rakiet 3M9ME istnieje możliwość przedłużania okresu ich eksploatacji. Aby określić warunki i czas przedłużenia, okresowo przeprowadza się badania ich stanu technicznego. Jednym z elementów decydującym o poprawnym i skutecznym działaniu rakiet są zbiorniki powietrza stanowiące niezbędne źródło energii potrzebnej jej w locie. Ponieważ zbiorniki te napełniane są powietrzem o wysokim ciśnieniu: do 36,5 MPa, istnieje potrzeba bieżącej znajomości parametrów wytrzymałościowych materiału zbiorników i oceny jego trwałości. Z tego powodu poddane są one szerokiemu zakresowi badań, od hydraulicznych prób ciśnieniowych zaczynając, poprzez statyczne próby rozciągania, na badaniach zmęczeniowych kończąc. W artykule, na przykładzie dwóch zbiorników ww rakiet, przedstawiono wyniki pomiarów sygnałów emisji akustycznej w czasie wymuszeń hydraulicznych, a następnie rezultaty statycznego rozciągania i prób zmęczeniowych próbek pobranych z materiału zbiorników poddanych uprzednio hydraulicznym wymuszeniom.

## 2. Przedmiot badań

Przedmiotem badań były zbiorniki o kształcie kulistym, wykonane z dwóch półkul połączonych ze sobą spoiną obwodową. Średnica zewnętrzna zbiorników wynosiła około 295 mm, grubość ścianki od 5,24 do 6,2 mm, pojemność to ok. 11,8 l.

W wyniku oględzin zewnętrznych nie zaobserwowano uszkodzeń mechanicznych ani ognisk korozji na powierzchniach zbiorników, połączenia spawane nie ujawniły obecności wad.

W rezultacie badań ultradźwiękowych stwierdzono, że:

- materiał ścianek zbiorników w sąsiedztwie spoiny nie wykazywał rozwarstwień ani innych wad materiałowych;
- badane spoiny spełniają wymagania najwyższej klasy jakości B wg PN-EN ISO 5817 – wymagania ostre.

Zbiorniki posiadały tabliczkę znamionową z podstawowymi danymi identyfikacyjnymi oraz wpisaną adnotacją o przeprowadzonej wytrzymałościowej próbie ciśnieniowej po ich produkcji.

## 3. Analiza składu chemicznego materiału zbiorników i badania metalograficzne

W wyniku przeprowadzonej przy użyciu urządzenia Bruker S4 Explorer XRF analizy składu chemicznego stwierdzono następującą zawartość składników stopowych:

Tablica 1.

Składniki stopowe	Wagowy skład chemiczny %								
	Ti	Al	V	Si	Fe	Zn	S	P	Cr
	88,690	6,750	4,150	0,320	0,270	0,062	0,033	0,030	0,029

Pozwoliło to zidentyfikować badany materiał jako dwufazowy stop tytanu BT6 (odpowiednik Ti6Al4V).

Obserwacja mikrostruktury została wykonana przy użyciu mikroskopu świetlnego dla trzech charakterystycznych stref występujących w badanym elemencie. Analiza obrazów dla spoiny ujawniła grubo-ziarnistą, równoosiową mikrostrukturę. W strefie wpływu ciepła obserwuje się zmniejszenie wielkości ziaren w kierunku materiału rodzimego. Materiałem rodzimym jest dwufazowy stop tytanu BT6 (oznaczenie rosyjskie). Mikrostruktura ta jest typowa dla tego typu materiału.

Mikrostruktura spoiny jest bardziej gruboziarnista niż ścianki zbiornika (materiał rodzimy) co jest typowe dla materiału spawanego.

Mikrostruktura materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła i spoiny jest prawidłowa i typowa dla stopu BT6.

## 4. Hydrauliczne próby wytrzymałościowe wraz z jednoczesnym pomiarem sygnałów emisji akustycznej

### 4.1. Hydrauliczne próby wytrzymałościowe

Badane zbiorniki poddano cyklicznym obciążeniom do maksymalnego ciśnienia roboczego i zakończono próbą wytrzymałościową na ciśnienie 1,5 maksymalnego ciśnienia roboczego, wymaganego przez Dozór Techniczny tj. 55 MPa, zgodnie z poniższą tablicą.

Tablica 2.

Oznaczenie	Rok produkcji	Dotych. ilość napełnień do ciśnienia rob.	Ilość napełnień w czasie badań			
			ciśn. rob. 29,5 [MPa]	ciśn. max: 36,5 [MPa]	ciśn. próby: 54,8 [MPa]	uwagi
II	1975	1 raz do ciśnienia roboczego	0	3 razy	1 raz	
III	1976	3 razy do ciśnienia roboczego	0	5 razy	1 raz	

Do prób ciśnieniowych zbiorników kulistych zastosowano elektryczną tłokową pompę firmy VIST z dołączonym mostkowym systemem pomiaru wytwarzanego ciśnienia w zakresie 0 - 100 MPa. System pomiaru ciśnienia był wyposażony we wskaźnik cyfrowy oraz wyjście sygnału napięciowego o zakresie 0 - 5 V, odtwarzające roboczy zakres wytwarzanych ciśnień. Graniczny błąd układu pomiaru ciśnienia nie przekraczał  $\pm 0.5$  MPa.

Poddane powyższym obciążeniom zbiorniki przeszły wszystkie próby z wynikiem pozytywnym.

#### 4.2. Badanie sygnałów emisji akustycznej

W przypadku omawianych badań procesem generującym EA była próba ciśnieniowa dwóch zbiorników sprężonego powietrza.

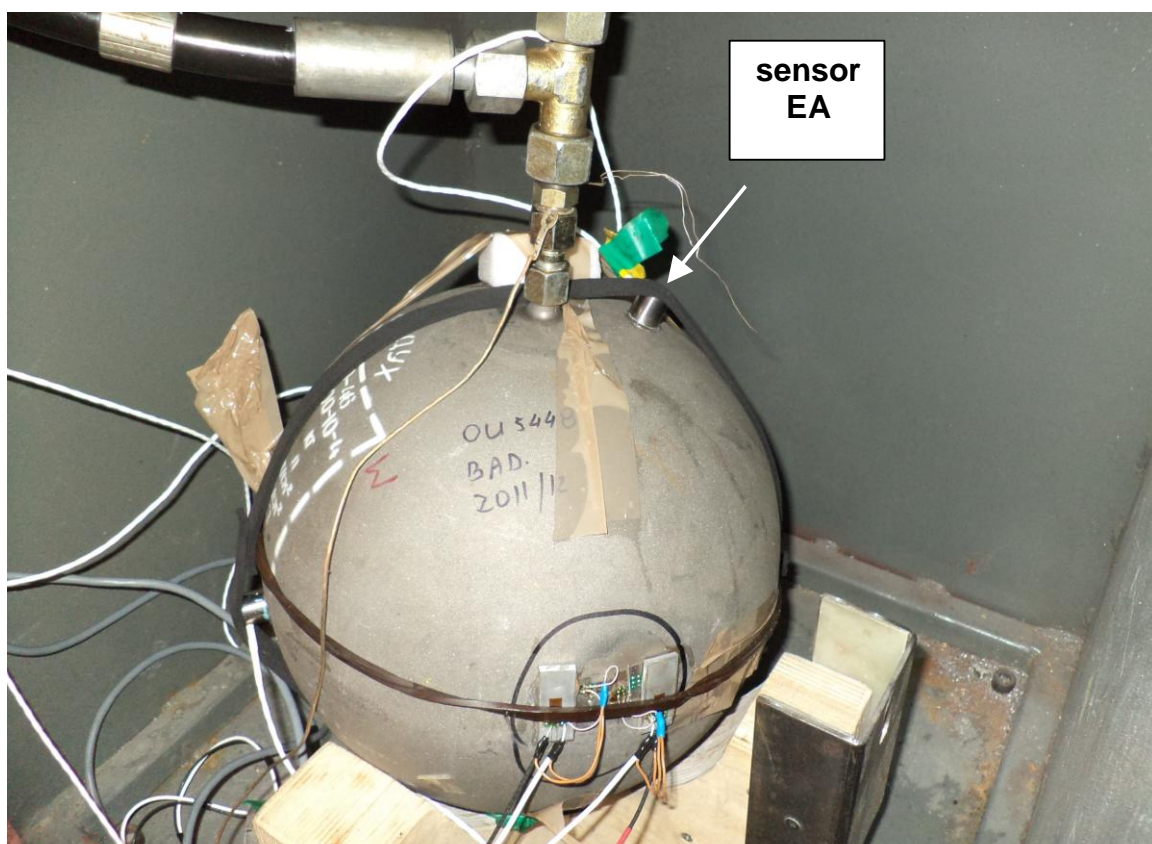
Niezbędna do przeprowadzenia pomiarów aparatura została przedstawiona na poniższej fotografii.



Fot.1. Trzykanałowa aparatura do pomiaru emisji akustycznej

Zastosowana w badaniach aparatura składa się z:

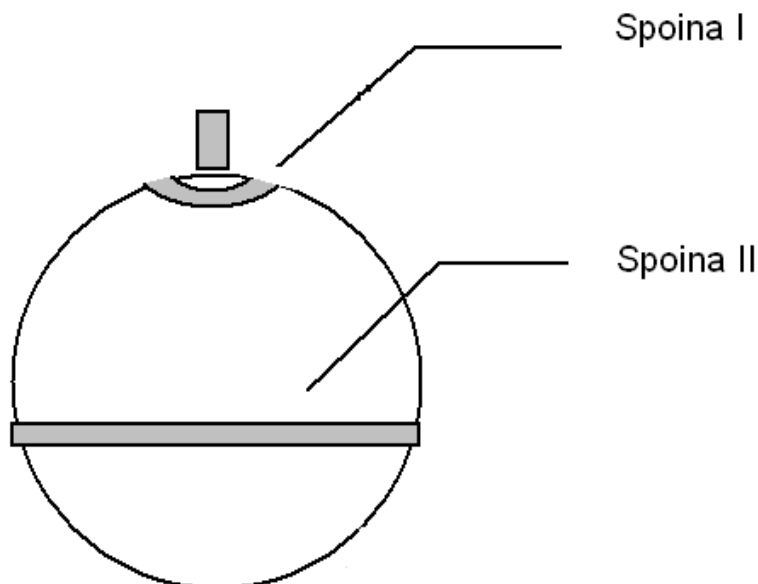
- trzech analizatorów emisji akustycznej; szerokopasmowe wzmacniacze sygnału z możliwością płynnej regulacji wzmocnienia w zakresie 20 - 66 dB; Sygnałem użytecznym generowanym przez analizatory EA jest wartość skuteczna (RMS), która podlega rejestracji za pomocą komputera PC.
- trzech sensorów EA typu WD produkcji Physical Acoustics Corporation. połączonych z analizatorami EA. W przypadku ww zbiorników zainstalowano na nich 3 sensory. Sensor nr 1. umieszczono się w pobliżu króćca dolotowego w górnej części zbiornika. Sensor nr 2 umieszczono się w środkowej części zbiornika, po przeciwnej stronie w odniesieniu do sensora nr1. Sensor nr 3 umieszczono się w dolnej części zbiornika, po przeciwnej stronie w odniesieniu do sensora nr 2. Obszar styku zbiornika z sensorem oczyszczono papierem ściernym z nierówności i pokryto cienką warstwą smaru silikonowego. Elastyczny docisk sensora do zbiornika (jednakowy dla wszystkich sensorów) zapewniono przy pomocy użyciu taśm z mikrogymy o szerokości 20 mm w sposób pokazany na Fot.2 i rys 3;
- okablowania sygnałowego, wykonanego przez firmę EA SYSTEM, umożliwiającego dołączenie ośmiu sygnałów pomiarowych do karty ADLINK 9112.
- karty pomiarowej ADLINK 9112, umieszczonej w złączu PCI komputera PC pracującego pod systemem WINDOWS XP. Oprogramowanie do rejestracji sygnałów pomiarowych oraz do generacji wykresów czasowych zarejestrowanych sygnałów opracowano w IPPT PAN (Z. Ranachowski).



Fot.2. Sposób zamocowania sensora EA z dociskiem elastycznym na górze zbiornika

Zbiornik nr 2 obciążono czterokrotnie. W pierwszym cyklu zakres ciśnień wynosił 4 - 36,5 - 4 MPa, w drugim cyklu przeprowadzono obciążenie tego zbiornika do ciśnienia próby równego 55 MPa

W trakcie obciążania zbiornika do ciśnienia próby stwierdzono niewielką aktywność sygnału emisji akustycznej w kanale I (blisko króćca napełniania) rozpoczęła się ona przy ciśnieniu 40 MPa, sygnały były rejestrowane w trakcie utrzymywania ciśnienia 55 MPa przez 60 sekund i zanikły po obniżeniu ciśnienia do wartości 54,3 MPa – rys.3.



Rys.1. Szkic usytuowania spoin badanych zbiorników

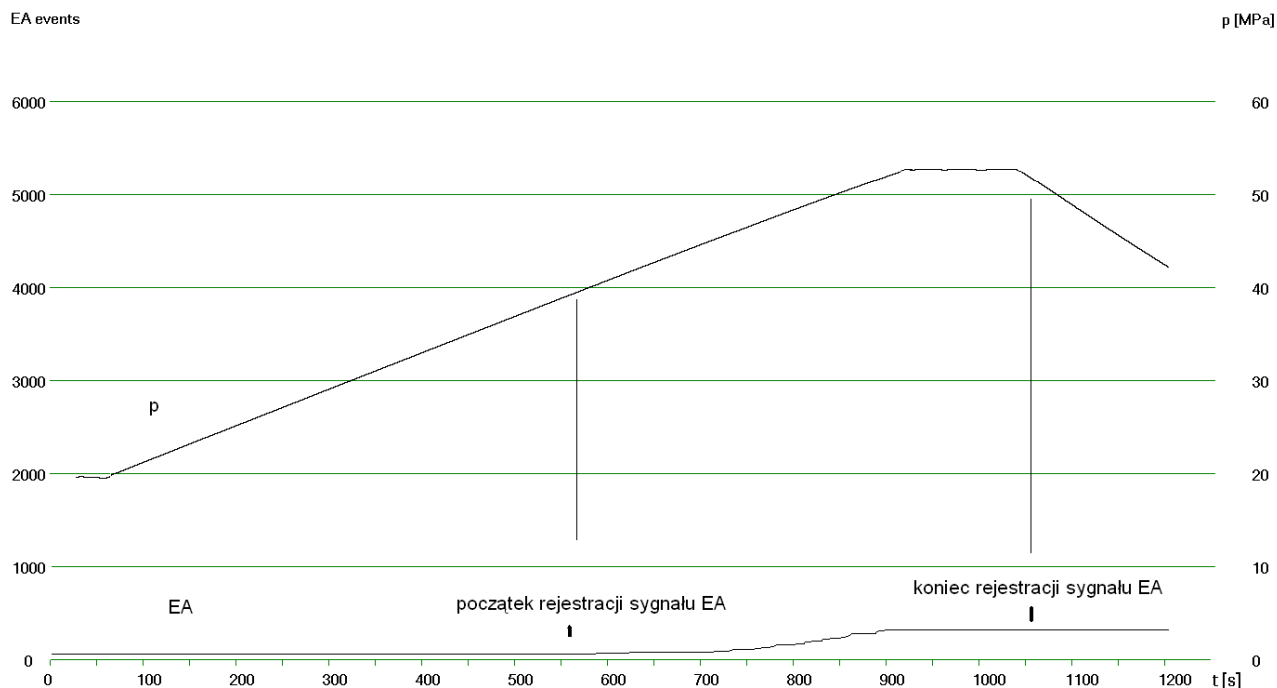
Zbiornik nr 3 (rok prod. 1976) obciążono sześciokrotnie. W pierwszym cyklu zakres ciśnień wynosił 0 - 36,5 - 4 MPa, w drugim, trzecim i czwartym: 4 - 36,5 - 4 MPa, w piątym: 4 - 36,5 - 20 MPa, a w ostatnim cyklu przeprowadzono obciążenie tego zbiornika do ciśnienia próby równego 55 MPa. W trakcie pięciu cykli roboczych nie zarejestrowano wyraźnych sygnałów EA.

W trakcie obciążania zbiornika do ciśnienia próby niewielka aktywność sygnału emisji akustycznej w kanale I (blisko króćca dolotowego) rozpoczęła się przy ciśnieniu 40 MPa, sygnały były rejestrowane w trakcie utrzymywania ciśnienia 55 MPa przez 60 sekund i zaniknęły po obniżeniu ciśnienia do wartości 54,3 MPa – rys.2.

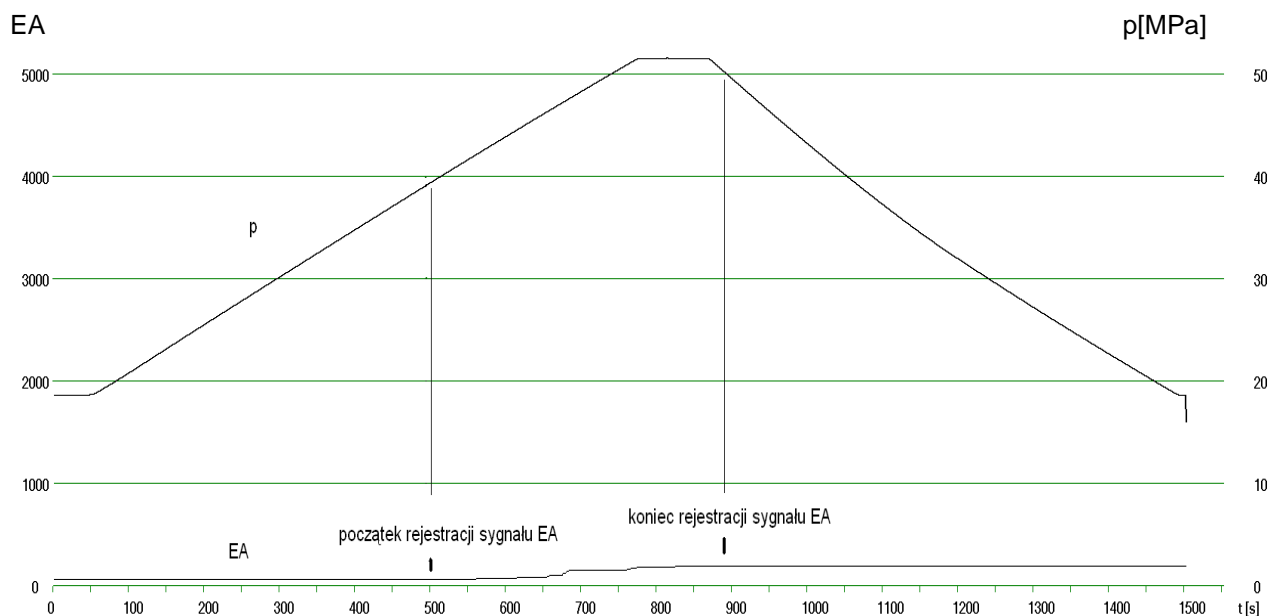
#### 4.3. Wnioski

Przy obciążaniu obu zbiorników ciśnieniem roboczym (29,5 MPa) i maksymalnym ciśnieniem roboczym (36,5 MPa), nie rejestrowano żadnych sygnałów emisji akustycznej. Natomiast w trakcie próby ciśnieniowej ( $1,5 \times p_r$ ), po przekroczeniu ciśnienia 40,0 MPa, zaobserwowano emisję akustyczną sygnału EA o niewielkim natężeniu (rys.2 i 3) pochodzącą z górnej części zbiornika, najprawdopodobniej z połączeń gwintowych sztucera napełniania zbiornika.

W trakcie obciążeń badanych zbiorników zarówno ciśnieniem roboczym, jak i ciśnieniem próby, nie były rejestrowane żadne sygnały EA wskazujące na destrukcję zbiorników.



**Rys.2. Wynik pomiaru ciśnienia oraz aktywności akustycznej w I kanale pomiaru EA, monitorującym górną część zbiornika nr 3. W badaniu obciążono zbiornik do ciśnienia próby. Emisja sygnału EA o niewielkim natężeniu rozpoczęła się po przekroczeniu ciśnienia 40 MPa i pochodziła z górnej części badanego zbiornika.**



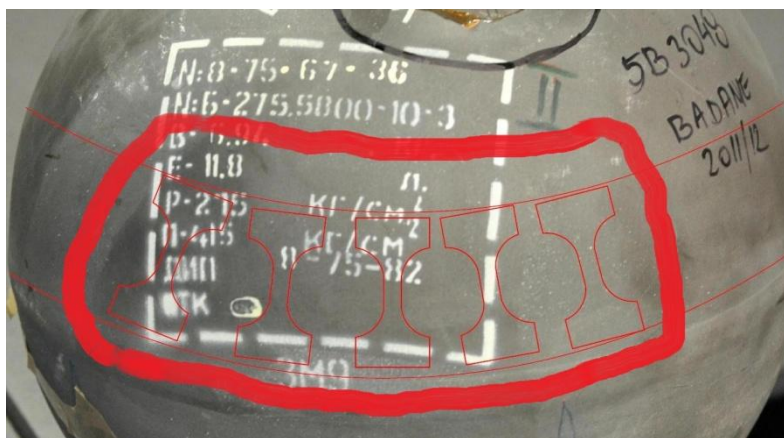
**Rys.3. Wynik pomiaru ciśnienia oraz aktywności akustycznej w I kanale pomiaru EA, monitorującym górną część zbiornika nr 2. W badaniu obciążono zbiornik do ciśnienia próby. Emisja sygnału EA o niewielkim natężeniu rozpoczęła się po przekroczeniu ciśnienia 40 MPa i pochodziła z górnej części badanego zbiornika**

## 5. Próby wytrzymałościowe

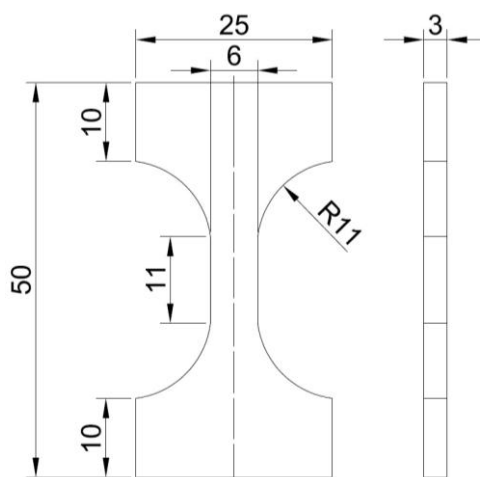
Poniższe badania wykonano w celu określenia parametrów wytrzymałościowych materiału zbiorników i oceny jego trwałości.

Każdy zbiornik kulisty został podzielony na dwie półkule: górną i dolną. Z każdej półkuli zostało wyciętych 12 mikropróbek. Sposób wycięcia próbek ilustruje fot.3, a ich geometrię rys.4. Wymiary próbek wynikają w sposób bezpośredni z geometrii zbiorników. Cienkościenna, kulista konstrukcja uniemożliwiła wykonanie próbek o przekroju okrągłym. W związku z powyższym zaprojektowany kształt próbki obowiązywał zarówno w przypadku statycznej próby rozciągania, jak i badań zmęczeniowych mających na celu wyznaczenie charakterystyki Wöhlera.

Z dwunastu próbek wyciętych z każdej półkuli trzy zostały przeznaczone do statycznych prób rozciągania, osiem do prób zmęczeniowych, a jedna była próbą rezerwową.



Fot.3. Schemat ułożenia wycinanych próbek



Rys.4. Geometria próbek wytrzymałościowych

### 5.1. Stanowisko badawcze

Zarówno badania zmęczeniowe, jak i statyczne próby rozciągania wykonane były na pracującej w pętli sprzężenia zwrotnego wytrzymałościowej maszynie serwohydraulicznej MTS 858. Maszyna ta pozwala na osiowe obciążenie próbek siłą +/- 25kN. System MTS-858 wyposażony jest w sterownik MTS i oprogramowanie *TestStarII*. W przypadku testów

zmęczeniowych próbek wyciętych ze zbiorników kulistych zastosowane zostało sterowanie siłą, a w przypadku statycznej próby rozciągania sterowanie przemieszczeniem.

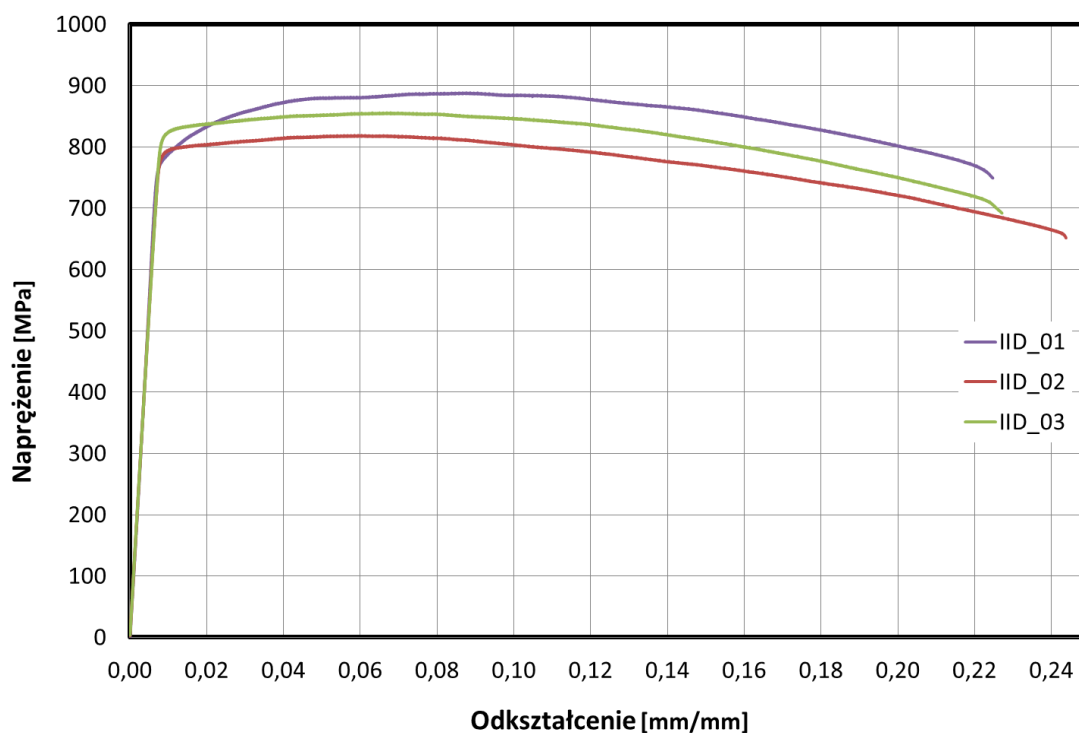
## 5.2. Oprzyrządowanie i warunki pomiarowe

Extensometr wzdluzny MTS 634.31F-24 o bazie pomiarowej 10 [mm] zostal skalibrowany do pomiaru odkształcenia w zakresie  $0 \pm 0,1$  [mm/mm] oraz  $0 \pm 0,3$  [mm/mm].

Próbki poddawano statycznej próbie rozciągania przy sterowaniu sygnałem przemieszczenia tłoka maszyny wytrzymałościowej z prędkością 0,005 [mm/s].

W trakcie badania rejestrowano: czas [s], siłę [N], przemieszczenie tłoka maszyny [mm], wskazania extensometru [mm/mm]. Zapis wyników realizowano co 0,01 [s].

### Zbiornik „II”



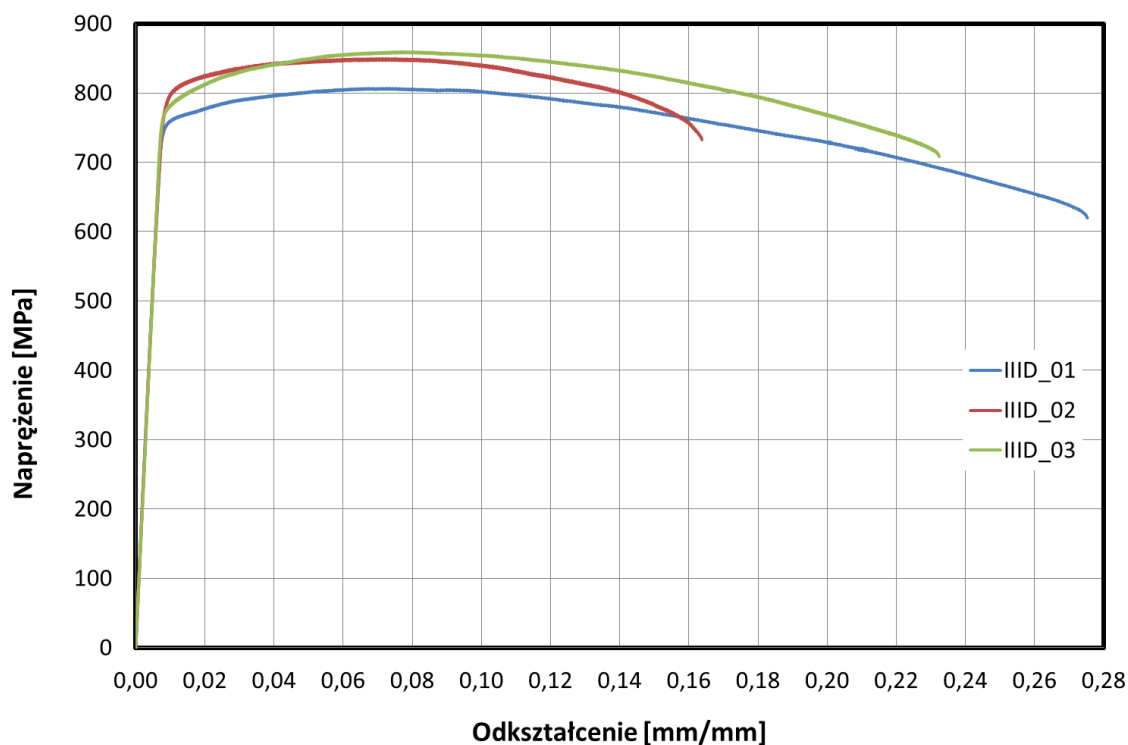
Rys.5. Krzywe rozciągania próbek z dolnej części zbiornika „II”

Tablica 3. Uśrednione naprężeniowe parametry mechaniczne z próby rozciągania próbek z górnej i dolnej części zbiornika „II”

	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ [MPa]	Umowna granica plastyczności $R_{e0,2}$ [MPa]	Moduł Younga [MPa]
Średnia IIG	912	783	105076
Średnia IID	854	799	106698
Średnia II	883	791	105887



## Zbiornik „III”



Rys.6. Krzywe rozciągania próbek z dolnej części zbiornika „III”

Tabela 4. Uśrednione naprężeniowe parametry mechaniczne z próby rozciągania próbek z górnej i dolnej części zbiornika „III”

	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ [MPa]	Umowna granica plastyczności $R_{e0,2}$ [MPa]	Moduł Younga [MPa]
Średnia IIIG	856	778	102173
Średnia IID	839	774	106367
Średnia III	848	776	104270

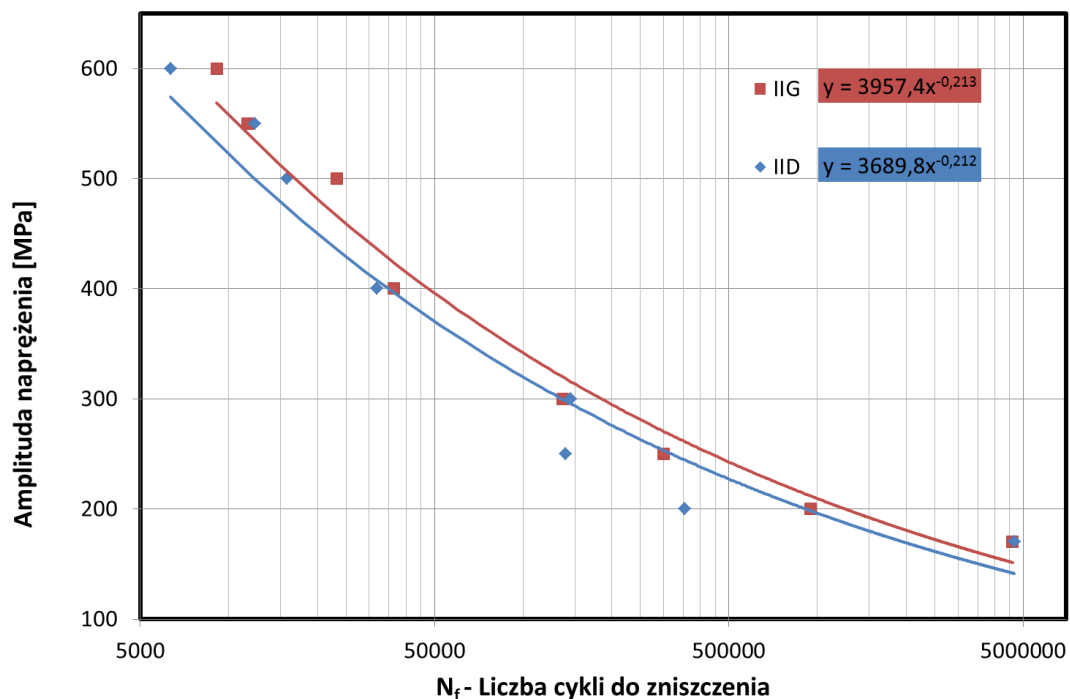
## 6. Badania zmęczeniowe

### 6.1. Parametry badania

Obciążenie realizowano przy sterowaniu siłą i zachowaniu zerowej wartości średniej w cyklu, oraz stałej wartości amplitudy naprężenia dla danej próbki. Zastosowano wahadłowy cykl obciążenia ( $\sigma_m=0$ ) z częstotliwością wynoszącą 20 [Hz]. Badania zmęczeniowe przeprowadzono w zakresie amplitudy naprężenia od 170 [MPa] do 600 [MPa], tylko dla półkuli IIIG. Dla pozostałych półkul zakres amplitud wynosił od 150 [MPa] do 600 [MPa]

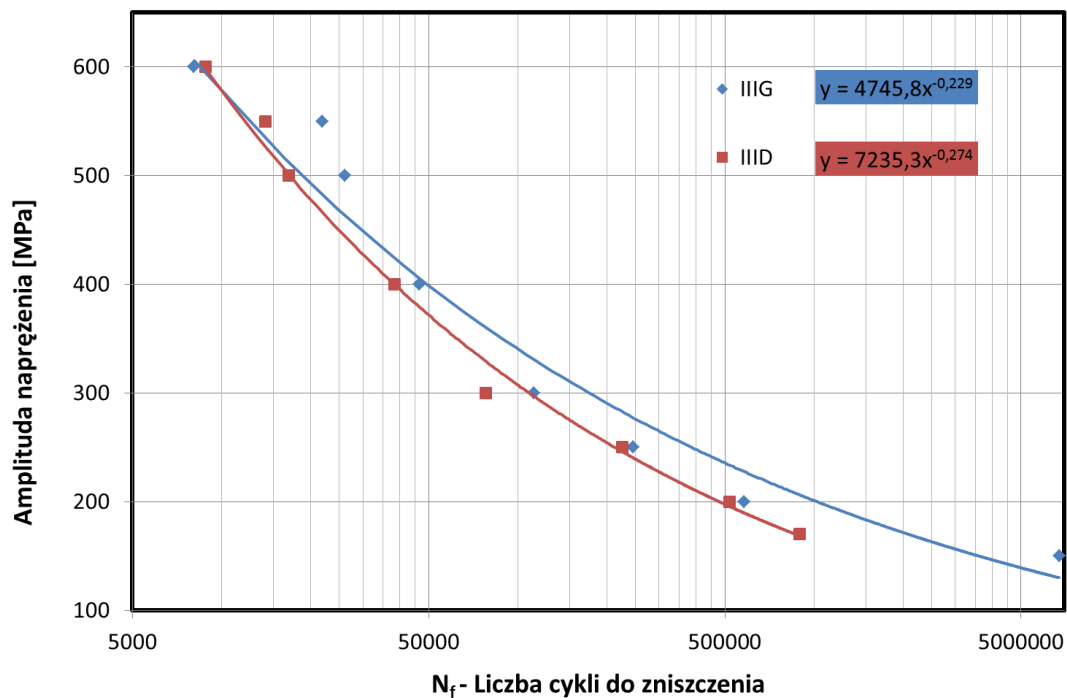
## 6.2. Wyniki testów zmęczeniowych

### Zbiornik „II”



Rys.7. Charakterystyka Wöhlera dla górnej i dolnej półkuli zbiornika „II”

### Zbiornik „III”



Rys. 8. Charakterystyka Wöhlera dla górnej i dolnej półkuli zbiornika „III”

Tablica 5.

Amplituda [MPa]	III G	III D	II G	II D
600	8079	8825	9098	6350
550	21921	14071	11611	12263
500	26119	16816	23285	15783
400	46674	38376	36303	31955
300	113460	78161	135999	144935
250	245425	225431	300878	139684

## 7. Podsumowanie

Zbiorniki, mimo długotrwałej eksploatacji są w dobrym stanie technicznym. Użyty do ich wykonania stop tytanu BT6 posiada wysoką wytrzymałość.

Eksperymentalnie określone parametry wytrzymałościowe wynoszą, średnio, dla materiału zbiornika:

- wytrzymałość na rozciąganie  $R_m=869$  MPa;
- umowna granica plastyczności  $R_{p0,2}=784$  MPa.

Obliczeniowe naprężenia w ścianie zbiornika dla jej średniej grubości 5,72 mm wynoszą:

- dla ciśnienia roboczego 36,5 MPa: 470 MPa;
- dla ciśnienia próby 55 Mpa: 709 MPa.

i są niższe od wartości eksperymetalnych.

Z badań zmęczeniowych wynika, że przy amplitudzie obciążenia rzędu 600 MPa (ciśnienie bliskie ciśnieniu próby) zerwanie próbki nastąpi nie wcześniej niż po 6350 cyklach.

## Literatura

- [1] IPPT PAN, Zakład Wytrzymałości Materiałów. „ Wykonanie badań materiałowych czterech zbiorników wysokociśnieniowych obciążonych wymuszeniami o różnych intensywnościach z zakresu 5-60 MPa.” Warszawa 2012r.
- [2] IPPT PAN, Zakład Wytrzymałości Materiałów. „ Udział w badaniach sygnałów EA i naprężeń wewnętrznych trzech zbiorników kulistych.” Warszawa 2012 r.
- [3] St. Rosiński. „Wytrzymałość materiałów.” PWSZ Warszawa 1962.
- [4] WUDT-UC-WO-O/04. Elementy kuliste podlegające ciśnieniu wewnętrznemu. W-wa 2005