

## KOMPLEKSOWE BADANIA WYSOKOCIŚNIENIOWYCH ZBIORNIKÓW POWIETRZA PO WIELOLETNIM UŻYTKOWANIU

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metody i wybrane wyniki badań kulistych zbiorników wysokociśnieniowych na sprężone powietrze stosowanych w raketach przeciwlotniczych typu ziemia powietrze. Opisano badania metodą wizualną, emisji akustycznej, ultradźwiękową, endoskopową oraz badania materiałowe. Badaniom poddano materiał konstrukcyjny zbiorników wysokociśnieniowych, pokrycia antykorozyjne, jakość połączeń spawanych oraz połączeń gwintowych. Omówione zostały metody badań, wykorzystane przyrządy i aparatura badawcza, warunki przeprowadzania badań oraz uzyskane rezultaty. Zaprezentowane przedsięwzięcia badawcze umożliwiają określenie stanu technicznego rakiet ziemia powietrze po ich wieloletniej eksploatacji. Są jednym z elementów badań wykorzystywanych podczas procesu prognozowania okresu eksploatacji ww. rakiet. Mają one na celu umożliwienie bezpiecznej eksploatacji rakiet przeciwlotniczych, po przekroczeniu okresu eksploatacji gwarantowanego przez producenta.

### 1. Wstęp

W niniejszym artykule przedstawiono metody i wyniki badań wysokociśnieniowych zbiorników powietrza stosowanych w raketach przeciwlotniczych. Są to zbiorniki kuliste wykonane ze stopu tytanu, poprzez połączenie dwóch półczasz spoiną obwodową. Posiadają wspawane króćce zakończone złączami gwintowymi. Podczas procesu eksploatacji zbiorniki mogą być wielokrotnie napełniane do ciśnienia ok. 32 MPa i następnie ciśnienie jest zmniejszane do wartości konserwującej ok. 4 MPa. W związku z tym w korpusie zbiornika powietrza występują znaczne naprężenia. Wszelkie wady materiałowe, technologiczne lub uszkodzenia eksploatacyjne zbiornika mogą być przyczyną jego uszkodzenia powodując znaczne zagrożenie podczas napełniania do wysokiego ciśnienia i przechowywania w stanie napełnionym.

W związku z powyższym w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia wykonuje się badania zbiorników powietrza, aby możliwe zagrożenia ograniczyć do minimum. Poniżej przedstawiono metody badawcze i ich wyniki dla zbiorników powietrza rakiet KUB.

### 2. Cel i przedmiot badań

W Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia wykonywane są badania różnych typów rakiet mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa ich eksploatacji po przekroczeniu czasu eksploatacji gwarantowanego przez producenta. Wśród badanych elementów są wysokociśnieniowe zbiorniki powietrza. Celem badań jest ocena ich aktualnego stanu technicznego, przy uwzględnieniu długotrwałej eksploatacji oraz określenie możliwości i warunków dalszego użytkowania.. W artykule przedstawiono przebieg badań zbiorników rakiet KUB.

### 3. Przebieg i wyniki badań

#### 3.1. Badania makroskopowe – przegląd zewnętrzny.

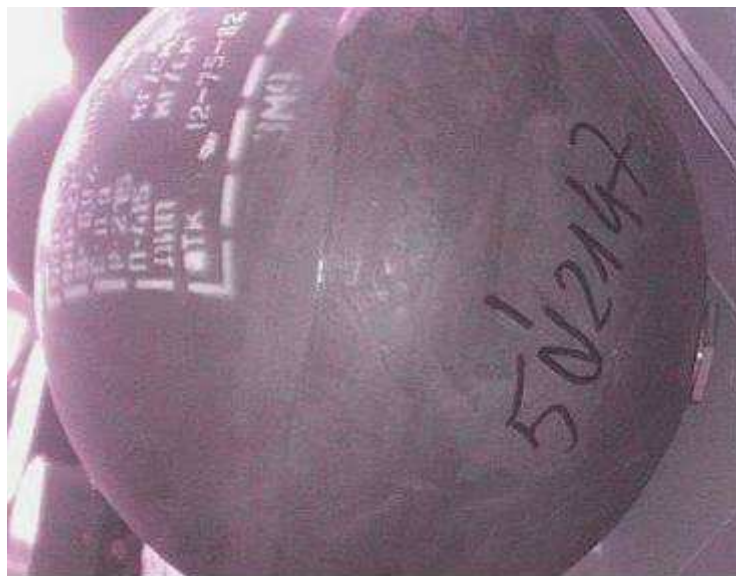
Celem badań makroskopowych jest ocena ogólnego stanu technicznego i wykrycie różnego rodzaju uszkodzeń eksploatacyjnych oraz wad materiałowych dających się zaobserwować okiem nieuzbrojonym lub przy niewielkim powiększeniu, zwykle nie przekraczającym 30x. Badania te z reguły stanowią podstawę do zaplanowania dalszych badań i do wytypowania miejsc, z których zostają pobrane próbki do innych, szczegółowych badań materiałowych i analiz.

W zakres przeglądu zewnętrznego wchodzi:

- ocena stanu technicznego powierzchni zewnętrznych zbiorników, ze względu na ewentualną obecność uszkodzeń mechanicznych i ognisk korozji;
- ocena jakości powłok antykorozyjnych;
- ocena jakości połączeń spawanych;
- ocena jakości połączeń gwintowanych;
- obecność tabliczki znamionowej i adnotacji kontroli technicznej o przeprowadzeniu próby wytrzymałościowej.

W wyniku eksploatacji warstwa powłoki może wykazywać zniszczenia w postaci: utraty połysku, kredowania i zmiany barwy. Ponadto mogą występować pęcherze, złuszczenia, rysy, pęknięcia oraz pojedyncze lub rozległe ogniska rdzy lub innych produktów korozji metalu. Szczególne znaczenie przy ocenie stanu technicznego mają badania makroskopowe złączy spawanych. Złącza te mogą mieć szereg wad, które powstały już w procesie wytwarzania i mogą być przyczyną przyspieszonej degradacji materiału w tych miejscach w trakcie eksploatacji. Do typowych wad połączeń spawanych należy zaliczyć:

- błędy kształtu geometrycznego i wymiarów poprzecznych spoiny,
- wady budowy spoiny, takie jak rozlewy, nawisy, brak przetopu podtopienia, wycieki, przyklejenia,
- nieciągłości metalu spoiny i złącza (porowatość, zażużlenia i pęknięcia).



Rys.1. Kulisty zbiornik powietrza.

W wyniku przeprowadzonego przeglądu stwierdzono dobry stan powierzchni zewnętrznych i powłok antykorozyjnych oraz połączeń gwintowanych; nie zaobserwowano ognisk

i śladów korozji. Połączenia spawane badanych zbiorników bez widocznych wad i uszkodzeń, kształt lica spoiny prawidłowy.

Wszystkie zbiorniki posiadały tabliczkę znamionową z podstawowymi danymi identyfikacyjnymi oraz wpisaną adnotacją o przeprowadzonej, wytrzymałościowej próbie ciśnieniowej.

### 3.2. Badania ultradźwiękowe

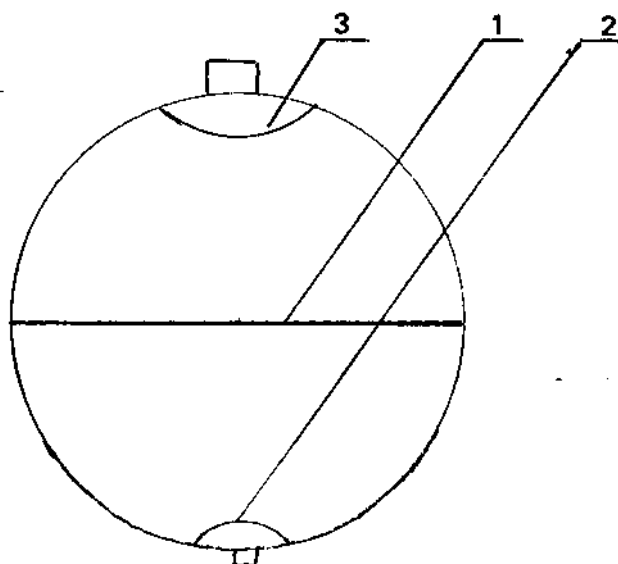
#### 3.2.1. Cel badań.

Celem ultradźwiękowych badań zbiorników powietrza było wykrycie ewentualnych wad typu: pęknięcia, brak przetopu, pęcherze, wtrącenia, wżery. Dodatkowo sprawdzono materiał ścianek zbiorników w sąsiedztwie spoin ze względu na ewentualne ubytki grubości i rozwarstwienia.

#### 3.2.2. Zakres badań.

– Badanie połączeń spawanych zbiorników powietrza

Badanie połączeń spawanych zbiorników powietrza przeprowadzono przy użyciu głowicy 4T70°A7.

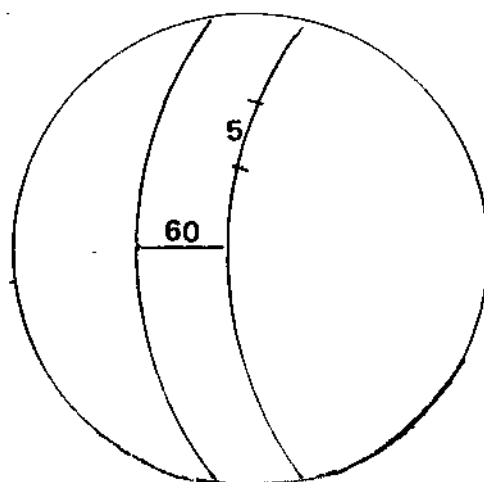


Rys.2. Schemat położenia badanych połączeń spawanych.

– Pomiar grubości ścianek

Pomiar grubości ścianek badanych zbiorników powietrza przeprowadzono przy użyciu grubościomierza ultradźwiękowego współpracującego z głowicą 4LDS10H.

Pomiar grubości ścianek zbiorników powietrza wykonano w płaszczyźnie południkowej -prostopadłej do osi spoiny łączącej czasze kuliste zbiorników powietrza co 60° odmierzanych wzdłuż osi spoiny łączącej czasze. Odległość punktów pomiarowych w płaszczyźnie południkowej wynosiła ok.5 cm. Pomiar wykonano w miejscach dostępnych.



Rys.3. Schemat siatki pomiarowej.

### 3.2.3. Przebieg i wyniki badań ultradźwiękowych

Badania zbiorników wymontowanych z przedziałów aparaturowych przeprowadzone zostały przez pracowników naukowych IPPT PAN, a ich wyniki przedstawiono poniżej.

W przeprowadzonych badaniach zastosowano impulsową metodę echa, polegającą na wykrywaniu sygnałów ultradźwiękowych (ech) odbitych od nieciągłości materiału.

Do badań wykorzystano cyfrowy defektoskop ultradźwiękowy oraz głowicę normalną fal podłużnych i kątową fal poprzecznych. Połączenia spawane zbiorników badane były głowicą kątową fal poprzecznych o kącie załamania  $70^\circ$ , natomiast materiał ścianek głowicą normalną fal podłużnych, wprowadzającą fale ultradźwiękowe prostopadle do powierzchni ścianki. Dodatkowo, za pomocą głowicy normalnej fal podłużnych dokonano wrywkowych pomiarów grubości ścianek wszystkich badanych zbiorników.

W badaniach zastosowano metodę kontaktową, wykorzystując jako sprzężenie akustyczne żel ultrasonograficzny. Przed nałożeniem środka sprzęgającego powierzchnia zbiorników w okolicy spoin została przygotowana przez mechaniczne oczyszczenie na szerokości ok. 50 mm po obu stronach spoiny.

Stopka głowicy kątowej została dopasowana do krzywizny powierzchni zbiorników przez szlifowanie. Dla określenia czułości badania oraz skalowania zakresu obserwacji wykonano specjalne próbki wzorcowe z materiału rodzimego zbiorników. Posiadały one nacięcia o głębokości 0,7 mm na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej. Próbki te wykorzystano następnie do sporządzenia krzywej odniesienia DAC, będącej podstawą do oceny wskazań.

Badania wykonano zgodnie z aktualnymi normami europejskimi, przyjmując jako podstawę oceny najwyższą klasę jakości spoin B wg PN-EN ISO – wymagania ostre.

#### Techniczne warunki badania.

Tabela 1. Dane zbiorników.

Objętość	11,9 dm <sup>3</sup>
Średnica zewnętrzna Dz	295 mm
Grubość ścianki	5,8 mm
Materiał rodzimy	Stop tytanu
Profil rowka spoiny	V
Typ złącza	doczołowe

Tabela 2. Poziom jakości badania.

Poziom akceptacji	Poziom 2 wg PN-EN 1712
Poziom odniesienia	Krzywa DAC dla rowka 0,7 mm
Poziom oceny	Poziom odniesienia – 10 dB
Poziom rejestracji	Poziom odniesienia – 6 dB

Tabela 3. Parametry techniki badania.

Klasa badania wg EN 1714	B
Technika nastawienia czułości	DAC
Reflektor odniesienia	$H_{RP} = 0,7 \text{ mm}$
Liczba kątów wprowadzenia	1
Pozycje przeszukiwania	Z obu stron spoiny

Tabela 4. Warunki badań

Typ głowic ultradźwiękowych	4T70A7	10LN7
Nominalny kąt głowicy	70°	0°
Nominalna częstotliwość	4 MHz	10 MHz
Wymiary przetwornika	7x7 mm	7 mm
Dopasowanie przylgi głowicy	tak	nie
Nastawiony zakres obserwacji	ZO=100 MM	ZO=20 mm
Poprawka na straty przeniesienia	$\Delta V_1=0 \text{ dB}$	$\Delta V_1=0 \text{ dB}$

## Wyniki badania

1. Wyniki pomiarów grubości ścianek zbiorników w kilkunastu losowo wybranych punktach: w zakresie od 5,5 do 6,2 mm.
2. Materiał ścianek zbiorników w sąsiedztwie spoin nie wykazuje rozwarstwień ani innych wad materiałowych.
3. Badane spoiny spełniają wymagania najwyższej klasy jakości B wg PN-EN ISO 5817- wymagania ostre.

### 3.3. Badania metodą endoskopową

Jedną z metod wykorzystywanych podczas badań trudno dostępnych elementów raket jest przegląd przy pomocy aparatury endoskopowej. Przegląd taki wykonuje się w celu wykrycia wad, które mogą wynikać z procesu technologicznego lub powstać w czasie eksploatacji. Przegląd wykonywany jest za pomocą endoskopu giętkiego (fiberoskopu) - VideoProbe LM645 C PA firmy EVEREST IMAGINS z systemem rejestracji wyników.

#### 3.3.1. Przedmiot badań

Przedmiotem badań były wszystkie zbiorniki wymontowane z dostarczonych raket.

#### 3.3.2. Cel badań

Celem badań były oględziny wizualne wewnętrznych ścianek zbiorników i połączeń spawanych dla ujawnienia ewentualnych ognisk korozji, uszkodzeń mechanicznych oraz oceny jakości spoin.

#### 3.3.3. Metoda badań

Do wnętrza zbiornika wprowadzono światłowód z kamerą poprzez króciec napełniania i przeprowadzono jego badanie zgodnie z opracowaną, własną procedurą.

#### 3.3.4. Wyniki badań

Przykładowe obrazy wnętrza zbiorników przedstawiono na poniższych rysunkach.



**Rys.4. Wnętrze zbiornika, widoczny spaw obwodowy i ślady powierzchniowych zczyszczeń.**



**Rys.5. Wnętrze zbiornika, widoczne połączenie spawane króćca napełniania, nierównomierna grań spoiny, przetop pełny, widoczne ślady powierzchniowych zczyszczeń.**



**Rys.6.** Wnętrze zbiornika, widoczny spaw obwodowy i wtrącenie (pobrano wycinek K17).



**Rys.7.** Wnętrze zbiornika, widoczne połączenie spawane króćca napelniania, nierównomierna grań spoiny, przetop pełny.



**Rys.8.** Wnętrze zbiornika, widoczne połączenie spawane korka, przetop pełny, widoczne liczne ślady powierzchniowych zczyszczeń.

## Wnioski.

1. W wyniku przeprowadzonych badań nie stwierdzono śladów obecności i ognisk korozji wewnętrznych ścianek zbiorników i połączeń spawanych.
2. Połączenia spawane charakteryzują się lokalnymi zniekształceniami ich grani, ale całkowitym przetopem.
3. Widoczne są ślady zacyzyszczeń powierzchniowych, wykonywanych w zakładzie produkcyjnym.
4. W celu identyfikacji wtrącenia widocznego na Rys.6, pobrano z tego miejsca wycinek K17 do badań materiałowych.

## 3.4. Hydrauliczne badania wytrzymałościowe

### 3.4.1. Przedmiot badań.

Przedmiotem badań były zbiorniki wymontowane z raket.

Ogólne parametry techniczne i eksploatacyjne zbiorników na sprężone powietrze stosowane w rakietach KUB podano poniżej.

- objętość: 11,9 l;
- średnica zewnętrzna: 293 mm;
- ciśnienie powietrza w zbiorniku – produkcyjne: 27,5MPa;
- ciśnienie próby producenta: 41,5MPa.

Normatywy eksploatacyjne:

- dopuszczalna ilość napełnień zbiornika: 32;
- w tym nie więcej niż 10 napełnień do ciśnienia 36,5MPa.

Robocze ciśnienie powietrza w zbiorniku kulistym zespołu pneumatycznego rakiety w porze letniej powinno być w granicach: 27,5 MPa w temperaturze +20°C.

### 3.4.2. Cel badań.

Celem badań było sprawdzenie wytrzymałości zbiornika, na specjalnym stanowisku (Rys.9 i Rys.10), poprzez wykonanie próby wytrzymałościowej na ciśnienie wymagane przepisami Dozoru Technicznego, tj.:

$$P_p = 1,5 p_r$$

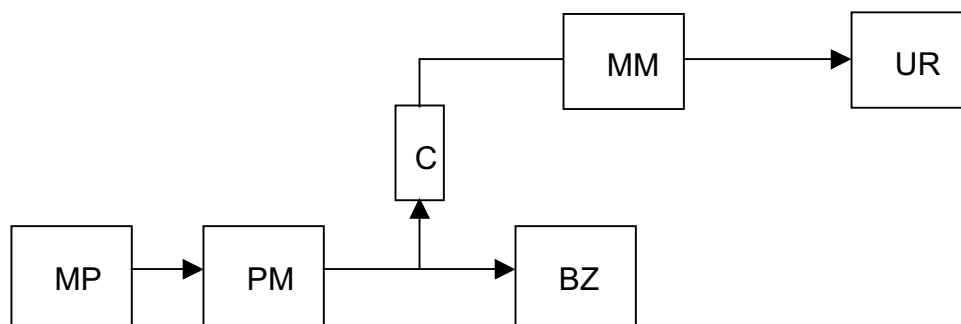
gdzie:

$P_p$  – ciśnienie próby;  $P_r$  – maksymalne ciśnienie robocze.

Przyjęto ciśnienie robocze w wysokości 37 MPa, zatem ciśnienie próby wyniosło 55,5 MPa i utrzymywane było w czasie >1 min.

### 3.4.3. Przebieg i wyniki badań

Schemat układu pomiarowego do badania zbiornika powietrza rakiety KUB przedstawiono na poniższym rysunku.



**Rys.9. Schemat stanowiska pomiarowego.**

Gdzie:



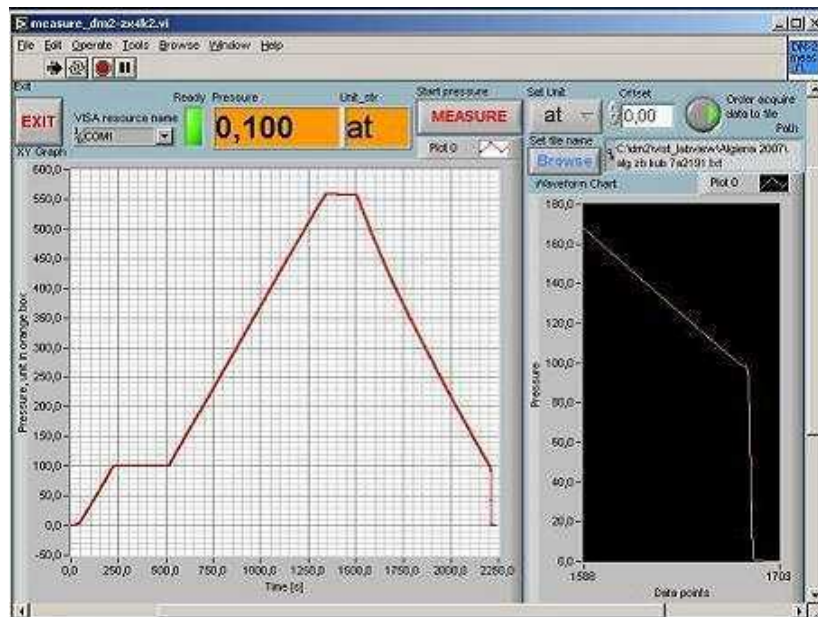
MP – moduł pomiarowy z automatycznym sterownikiem DM-2/S-1;  
 PM – prasa manometryczna z czujnikiem;  
 BZ – badany zbiornik powietrza;  
 C- czujnik ciśnienia;  
 MM – multimanometr DM-2;  
 UR – urządzenie rejestrujące PXI-1002 z monitorem.



**Rys.10. Widok stanowiska laboratoryjnego do hydraulicznej próby wytrzymałościowej zbiornika.**

Wszystkie zbiorniki poddane zostały próbie hydraulicznej na ciśnienie 55,5 Mpa, w czasie nie krótszym niż 1 minuta.

Wynik próby okazał się pozytywny. Przykładowy wykres ciśnienia próby na Rys.11.



**Rys.11. Przebieg ciśnienia w zbiorniku rakiety, z przerwą wymuszoną skokiem pompy.**

Wszystkie badane zbiorniki spełniają warunek wytrzymałości zgodny z wymaganiami Dozoru Technicznego.

### 3.5. Badania wytrzymałościowe z pomiarem sygnałów emisji akustycznej

Badania wytrzymałościowe zbiorników z pomiarem sygnałów emisji akustycznej przeprowadzono w kooperacji z Instytutem Podstawowych Problemów Techniki PAN.

#### 3.5.1. Opis metody badawczej

Zjawisko emisji akustycznej (EA) jest od dawna znane, jako słyszalne ludzkim uchem dźwięki towarzyszące kruchemu pękaniu materiałów lub przemieszczeniom ośrodka.

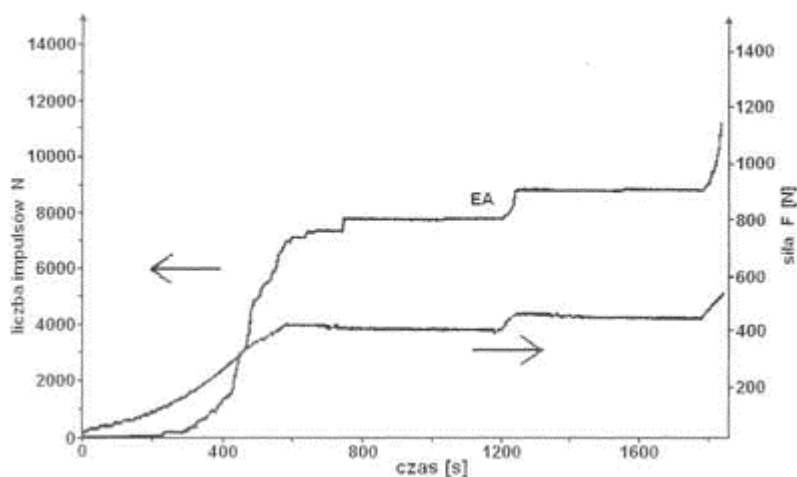
Terminem emisja akustyczna (EA) przyjęło się w międzynarodowej terminologii określać zjawisko generacji fal sprężystych w różnych ośrodkach stałych i cieczech. Źródłem emisji tych fal są zarówno procesy rozwoju mikropęknięć, generacja i anihilacja dyslokacji lub wzajemne przemieszczanie się fragmentów badanego ośrodka połączone z tarcieniem.

#### Emisja akustyczna w procesach odkształceń metali.

W ostatnich latach badania zjawiska EA znacznie się rozszerzyły, co stworzyło możliwości praktycznego zastosowania tej metody do monitorowania powstawania i rozwoju mikropęknięć w materiałach konstrukcyjnych, pod wpływem narastających obciążeń zewnętrznych.

Interesujące są badania zachowania się EA generowanej na skutek powstawania i propagacji szczelin (mikropęknięć), zwłaszcza w odniesieniu do stali konstrukcyjnych. Okazuje się, że w stalach wysokowytrzymałych, aktywność EA podczas wzrostu szczelin występuje w szerokim zakresie odkształceń, szczególnie w ostatnich 20% trwania testu rozciągania. Z kolei w stalach nisko wytrzymałych EA jest związana głównie z procesami dyslokacyjnymi w obszarze granicy plastyczności, a powstawanie i propagacja szczelin odbywa się w ciszy akustycznej, poniżej progu rejestracji impulsów EA.

Na Rys.12 przedstawiono przykładową zależność EA od parametrów mikropęknięć, których powstanie i rozrost stanowi prawdopodobnie główną przyczynę tego efektu.



Rys.12.

#### 3.5.2. Pomiar sygnałów emisji akustycznej w badaniach zbiorników powietrza.

Zbierany z powierzchni zbiornika sygnał EA w postaci fal sprężystych jest zamieniany na sygnał elektryczny za pomocą przetworników piezoelektrycznych. Na zaciskach przetwornika napięciowy sygnał EA ma postać gasnącej sinusoidy opisanej wzorem:

$$V=V_P \sin 2 \pi f \exp(-t/\tau)$$

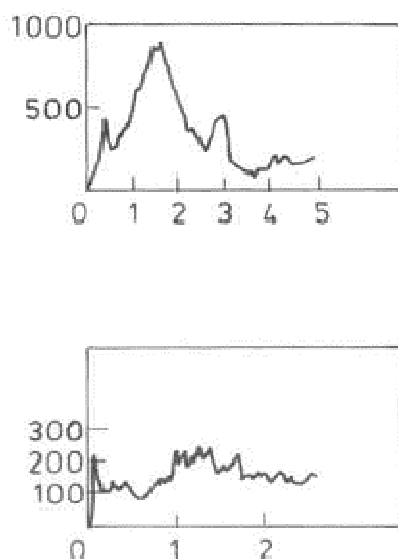
gdzie:

$f$  – częstotliwość rezonansowa przetwornika;  
 $\tau$  – dekrement tłumienia drgań w przetworniku;  
 $V_p$  – wartość szczytowa powstającego napięcia.

W opisywanych niżej pomiarach zastosowano przetworniki szerokopasmowe o wysokiej czułości i szerokości pasma pomiarowego w zakresie spadku sygnału do 10dB: 100-1000kHz. Sygnał EA był następnie poddawany wzmocnieniu i filtracji górnoprzepustowej (redukcja zakłóceń z pasma wibroakustycznego). W przypadku niniejszych pomiarów, eliminacji podlegały sygnały o częstotliwości niższej od 10kHz. Jednocześnie rejestracji podlegał proces wymuszenia mechanicznego sygnału emisji akustycznej. W procesie badania zbiorników zastosowano zapis ciśnienia wody pompowanej do zbiornika. Dane te były zapisywane w pamięci komputera monitorującego pomiar.

W ramach badań zastosowano trzy jednokanałowe analizatory emisji akustycznej, dołączone do komputera PC, pracującego w systemie operacyjnym Windows XP i wyposażonego w Pentium 2440 MHz. Przed rejestracją sygnałów EA dokonano kalibracji torów pomiarowych. Celem tej czynności było uzyskanie jednakowej czułości w torach pomiaru emisji akustycznej. Kalibracji dokonano za pomocą generatora sygnału wzorcowego o regulowanej amplitudzie, dołączonego na wejścia analizatorów EA. Czułość torów pomiaru emisji akustycznej sprawdzono za pomocą testu Nielsena, t.j. łamiąc grafit o średnicy 0,5mm i twardości 2H, 4cm od każdego z sensorów EA.

Na poniższym rysunku przedstawiono typowe charakterystyki wartości skutecznej sygnału EA (miliwołty sygnału RMS), generowanego w rozciąganych próbkach z duralu (na górze) oraz ze stali (na dole), w funkcji wydłużenia próbki, podanego w procentach.



Rys.13.

### 3.5.3. Przebieg badań

Badaniom poddano kuliste zbiorniki, przeznaczone do przechowywania sprężonego powietrza. Zbiorniki napełniano wodą destylowaną przy użyciu pompy tłokowej, napędzanej silnikiem elektrycznym.

Pomiar ciśnienia w instalacji prowadzony był za pomocą sensora tensometrycznego dołączonego do wzmacniacza mostkowego. Na zbiorniku umieszczono 3 sensory emisji aku-

stycznej (EA) w celu monitorowania fal sprężystych, generowanych w trakcie rozwoju uszkodzeń elementów zbiornika. Sensory typu WD posiadały czułość – 70dB, odniesioną do wartości wzorcowania 1V/ mikrobar dla drgań sprężystych w paśmie 100 – 1000kHz. Zostały one rozmieszczone w następujący sposób:

- sensor nr 1 – w pobliżu gwintowanego króćca napełniania;
- sensor nr 2 – w środku korka technologicznego;
- sensor nr 3 – w pobliżu spawanego połączenia obwodowego dwu czasz zbiornika.

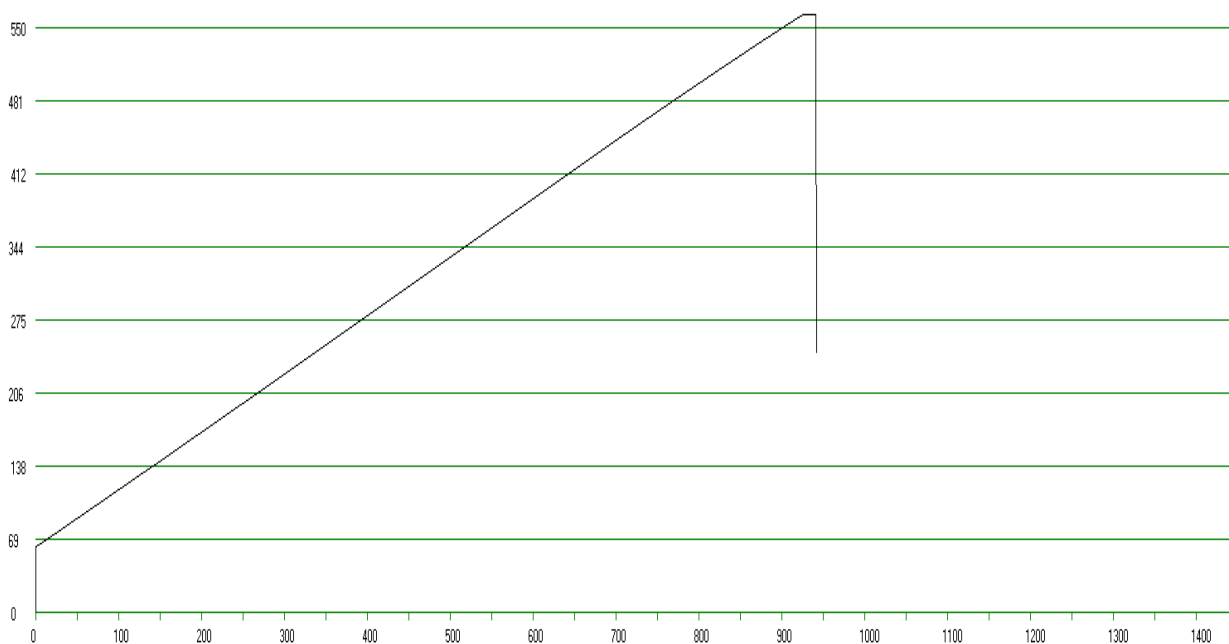
Sensory zostały dołączone do trzech analizatorów emisji akustycznej, w skład których wchodziły wzmacniacze o wartości 50dB, filtry górnoprzepustowe o częstotliwości odcięcia 10 kHz oraz przetworniki wartości skutecznej (RMS) mierzonego sygnału. Trzy sygnały z torów pomiaru EA oraz napięcie proporcjonalne do ciśnienia w zbiorniku były przetwarzane na postać cyfrową za pomocą 12 bitowej karty pomiarowej typu 9112 pracującej w systemie operacyjnym WINDOWS XP.

Po zakończeniu próby ciśnieniowej wydrukowano wyniki pomiarów w postaci:

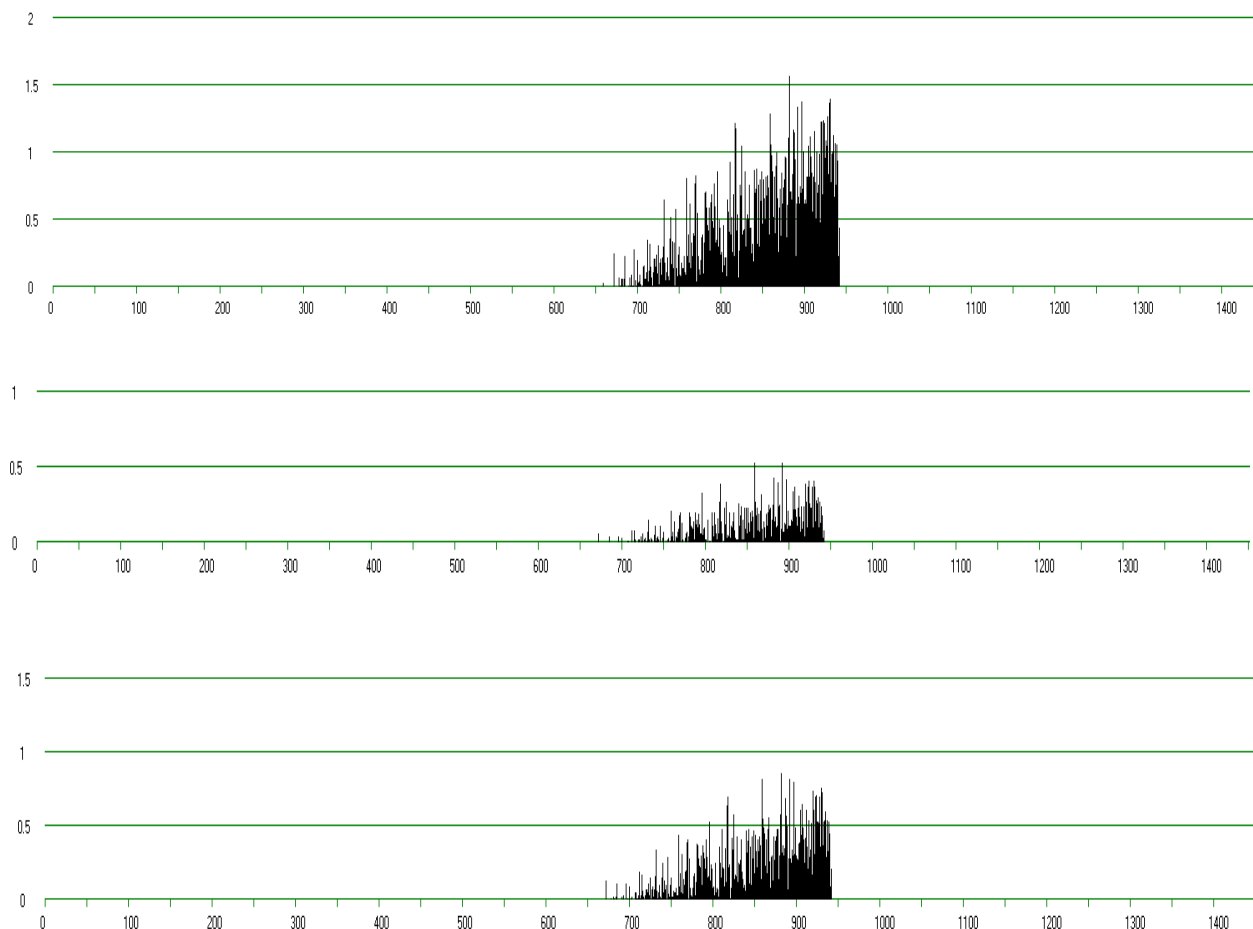
- wykresu zależności chwilowego ciśnienia w zbiorniku od czasu;
- wykresu zależności wartości skutecznej sygnału EA mierzonego przez sensory EA w funkcji czasu.

Na Rys.14 przedstawiono typowy zapis z procesu podnoszenia ciśnienia w zbiorniku, natomiast na Rys.15 zapisy sygnałów emisji akustycznej, kolejno (od góry) z sensorów:

- dolnego, przy korku;
- środkowego, przy spoinie obwodowej;
- górnego, przy króćcu napełniania.



**Rys.14. Wykres wzrostu ciśnienia w zbiorniku.**



**Rys.15. Zmierzone sygnały emisji akustyczne, kolejno (od góry) przez sensory: dolny-przy korku, środkowy-przy spoinie obwodowej, górny-przy króćcu napełniania.**

Z powyższych badań wynika, że sensor znajdujący się przy połączeniu gwintowym korka zbiornika odbiera sygnały EA o największej amplitudzie. Kolejne sensory: przy spawie obwodowym i króćcu napełniania rejestrują również sygnały EA, ale o coraz mniejszej amplitudzie. Źródło sygnałów nie wykazuje tendencji do wzrostu amplitudy emisji akustycznej po zatrzymaniu wzrostu ciśnienia i w okresie wyczekiwania ze stałym ciśnieniem.

#### 3.5.4. Wnioski

Z uwagi na charakter sygnałów emisji akustycznej, obszar występowania, uznano że ich źródłem jest połączenie gwintowe korka z płaszczem zbiornika. Aby rozstrzygnąć to definitywnie z jednego ze zbiorników pobrano następujące wycinki:

- K12 – wycinek z korkiem;
- K13 – wycinek ze spoiną obwodową;
- K14 – wycinek z króćcem napełniania.

Ponadto zbiornik tego typu poddano obliczeniom wytrzymałościowym celem ustalenia jego podstawowych charakterystyk, w tym określenia granicy plastyczności.

### 3.6. Badania materiałowe

#### 3.6.1. Wybór próbek do badań

Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań zbiorników, zdecydowano o pobraniu wycinków celem przeprowadzenia stosownych badań materiałowych, i obliczeń wytrzymałościowych przedstawionych na poniższych rysunkach.



Rys.16. Wycinek K12 z korkiem i jego połączeniem spawanym z płaszczem zbiornika.



Rys.17. Wycinek K13 z obwodowym połączeniem i fragmentami płaszcza zbiornika.





**Rys.18. Wycinek K14 z króćcem napełniania i jego połączeniem spawanym z płaszczem zbiornika.**



**Rys.19. Próbką K17 z widocznym wtrąceniem w okolicy połączenia spawanego.**



**Rys.20. Wycinek K-19 ze śladami zacyszczeń.**

### 3.6.2. Przebieg badań

Niniejsze badania przeprowadzono na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej i dotyczą badań wycinków pochodzących ze zbiorników powietrza oraz obliczeń wytrzymałościowych całego zbiornika.

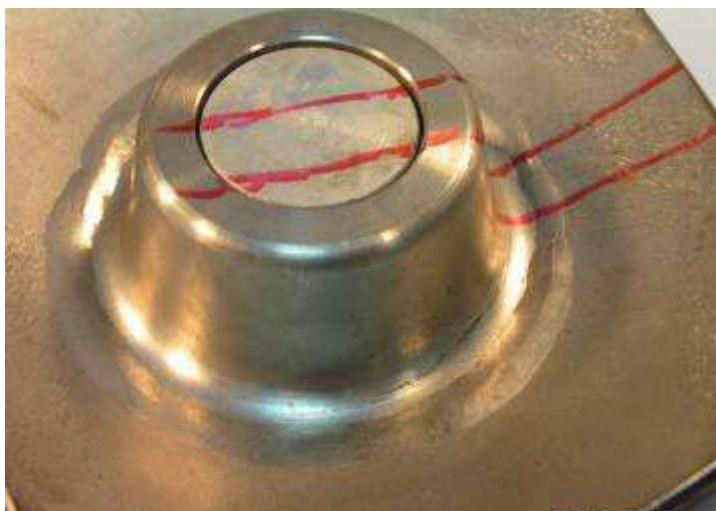
### **Wycinek K12.**

#### Badania wizualne



**Rys.21. Widok powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wycinka K12, króciec technologiczny.**





**Rys.22. Zdjęcie wycinka ze spoiną króćca technologicznego z zaznaczonym miejscem wycięcia próbki metalograficznej**

Powierzchnie wycinka płaszczki zbiornika są gładkie. Nie zaobserwowano ognisk korozji na zewnętrznej i wewnętrznej części wycinka zbiornika. Lico spoiny łączące króciec z półkulą zbiornika wykonano poprawnie, nie zauważono żadnych wad spawalniczych.

#### Badanie metalograficzne spoiny, ocena jej jakości

Obserwacje mikroskopowe zostały wykonane przy użyciu mikroskopu świetlnego na próbce wyciętej z badanego materiału. Obserwacja mikroskopowa została przeprowadzona dla trzech charakterystycznych stref występujących w materiale.



Spoina



Strefa wpływu ciepła – SWC



Materiał rodzimy

**Rys.23. Mikrostruktura badanego materiału wykonana dla spoiny, SWC i materiału rodzimego**

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

Pomiary twardości spoiny i materiału rodzimego

Pomiar mikrotwardości materiału rodzimego oraz spoiny (tabela 5) został wykonany zgodnie z normą PN-91/H-04360 „Pomiar twardości metali sposobem Vickersa od HV0.2 do HV100”. Pomiar mikrotwardości wykonano na próbkach metalograficznych twardościomierzem Vickersa, przyłożone obciążenie 200 g było przyłożone przez 5 sekund - HV0.2/5.

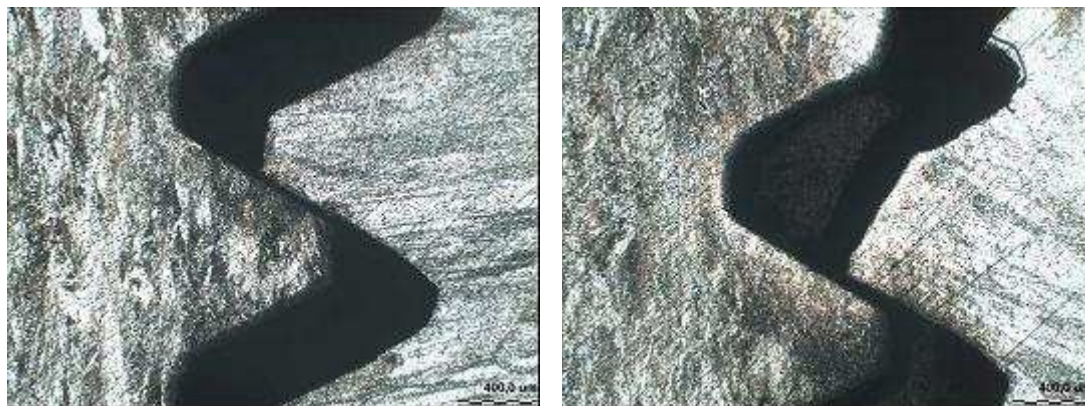
Tabela 5

Obszar pomiarowy	HV0.2/5
Materiał rodzimy	287
Spoina	218



Mniejsza mikrotwardość materiału spoiny niż mikrotwardość w materiale rodzimym jest typowa dla elementu spawanego.

Badania metalograficzne połączenia gwintowanego wykonane ze względu na wyniki emisji akustycznej.

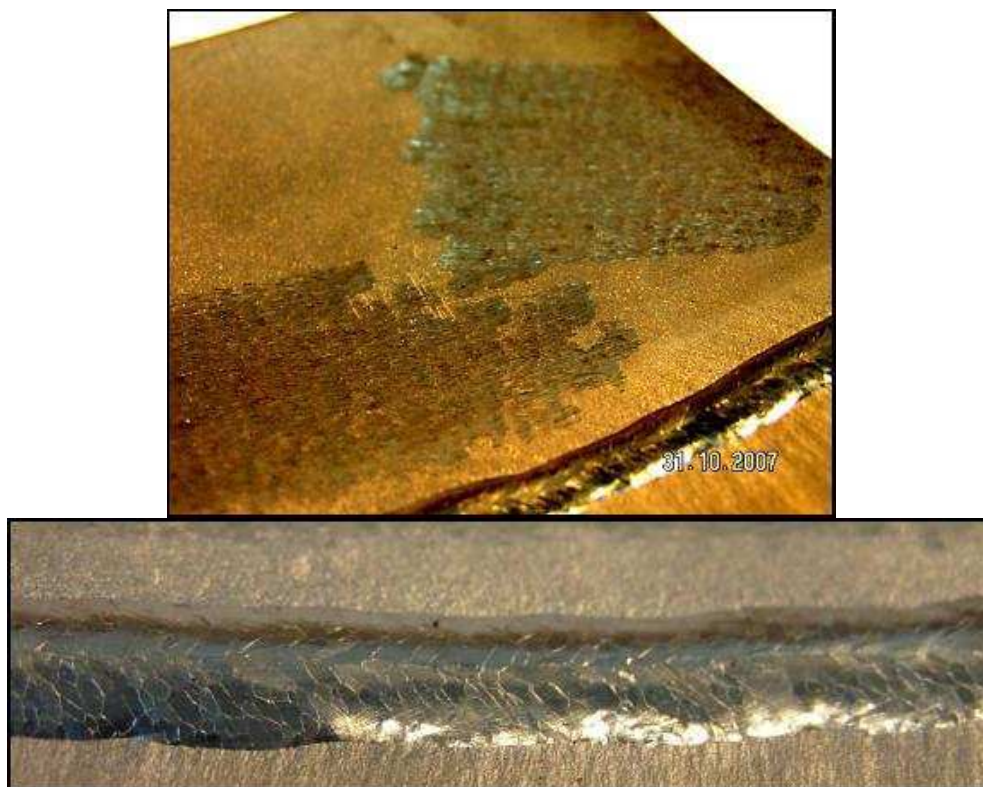


**Rys.24. Luz i uszkodzenia w połączeniu gwintowanym pomiędzy korkiem a króćcem**

Połączenie gwintowe wykazuje nadmierne luzy pomiędzy korkiem a króćcem (Rys.24), co może być źródłem emisji akustycznej. W połączeniu gwintowanym występują również uszkodzenia gwintu.

### **Wycinek K13.**

Badania wizualne



**Rys.25. Widok i połączenie spawane, spaw obwodowy, wycinka K13.**

Powierzchnie wycinka płaszcza zbiornika są gładkie. Nie zaobserwowano ognisk korozji na zewnętrznej i wewnętrznej części wycinka zbiornika. Lico spoiny łączące dwie półczaszki zbiornika wykonano poprawnie, nie zauważono żadnych wad spawalniczych.

#### Identyfikacja składu chemicznego materiału zbiornika

W celu dokonania analizy składu chemicznego i identyfikacji elementu pobrano wycinek materiału. Badanie analizy składu chemicznego zostało przeprowadzone przy użyciu urządzenia Bruker S4 Explorer XRF. Uzyskane wyniki składu chemicznego zbiornika zawiera Tabela 6. Porównanie otrzymanych wyników ze spisem rosyjskich stopów tytanu, pozwoliło zidentyfikować badany materiał jako dwufazowy stop tytanu BT6 (odpowiednik Ti6Al4V wg normy ASTM).

Tabela 6

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

#### Obróbka termiczna, technologia wykonania

Stopy tego typu poddawane są przesycaniu w temperaturze 955-970°C przez 1 godzinę, szybkemu schłodzeniu w wodzie i starzenia w temperaturze 480-595°C w czasie od 4 do 8 godzin. Wykonany z walcowanej blachy, następnie dwie połówki blachy zostały wytłoczone w postaci półkul i następnie zespawane ze sobą.

#### Pomiary twardości i podstawowe charakterystyki wytrzymałościowe.

Podstawowe charakterystyki właściwości mechanicznych dla stopu BT6 wg GOST (Ti6Al4V wg ASTM) przedstawia Tabela 7.

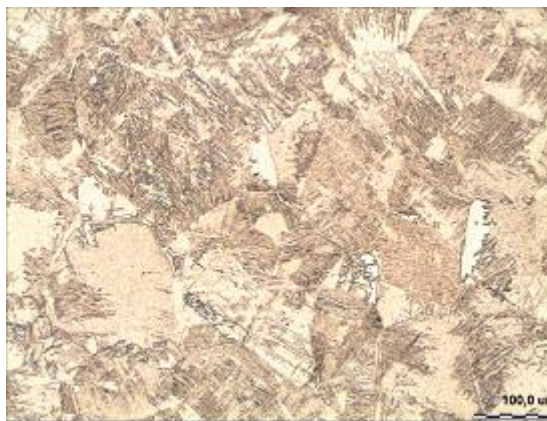
Tabela 7

Twardość	36HRC
Granica plastyczności	1103 MPa
Wytrzymałość na rozciąganie	1172 MPa
Wydłużenie całkowite	10 %

Dane wytrzymałościowe są charakterystyczne dla tego typu materiału.

#### Badanie metalograficzne spoiny, pomiar twardości, ocena jakości spoiny

Obserwacje mikroskopowe zostały wykonane przy użyciu mikroskopu świetlnego na próbce wyciętej z badanego materiału. Obserwacja mikroskopowa została przeprowadzona dla trzech charakterystycznych stref występujących w materiale (Rys.26).



Spoina



Strefa wpływu ciepła – SWC



Materiał rodzimy

**Rys.26. Obrazy mikrostruktur charakterystycznych obszarów występujących w materiale spawanym**

Obserwacja mikrostruktury przy użyciu mikroskopu świetlnego została wykonana 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 rodzimy jest dwufazowy stop tytanu BT6 (oznaczenie rosyjskie). Odpowiednikiem stopu BT6 jest stop oznaczany Ti6Al4V. 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. Na podstawie wyników badania wizualnego oraz analizy mikrostruktury połączenia spawanego można stwierdzić, iż spoina została wykonana w sposób prawidłowy. Powierzchnia wewnętrzna jest gładka i błyszcząca z widocznymi miejscami mechanicznego czyszczenia. Powierzchnia zewnętrzna jest ciemna i prawdopodobnie oksydowana. Na powierzchniach zewnętrznych i wewnętrznych nie stwierdzono występowania ognisk korozji.

#### **Wycinek K14.** Badania wizualne



**Rys.27. Widok powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wycinka K14, króciec napełniania.**

Powierzchnie wycinka płaszczu zbiornika są gładkie. Nie zaobserwowano ognisk korozji na zewnętrznej i wewnętrznej części wycinka zbiornika. Lico spoiny łączące króciec napełniania z półkulą zbiornika wykonano poprawnie, nie zauważono żadnych wad spawalniczych (Rys.28).



**Rys.28. Zdjęcie elementu K14 ze spoiną króćca napełniania z zaznaczonym miejscem pobrania próbki metalograficznej**

Badania metalograficzne spoiny, ocena jej jakości.

Obserwacje mikroskopowe zostały wykonane przy użyciu mikroskopu świetlnego na próbce wyciętej z badanego materiału. Obserwacja mikroskopowa została przeprowadzona dla trzech charakterystycznych stref występujących w materiale (Rys.29).



Spoina



Strefa wpływu ciepła – SWC



Materiał rodzimy

**Rys.29. Obrazy mikrostruktur charakterystycznych obszarów występujących w materiale spawanym**

Obserwacja mikrostruktury przy użyciu mikroskopu świetlnego została wykonana 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 rodzimy jest dwufazowy stop tytanu BT6 (oznaczenie rosyjskie). Odpowiednikiem stopu BT6 jest stop oznaczany Ti6Al4V. 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. Na podstawie wyników badania wizualnego oraz analizy mikrostruktury połączenia spawanego można stwierdzić iż spoina została wykonana w sposób prawidłowy.

#### Obliczenia wytrzymałościowe zbiornika.

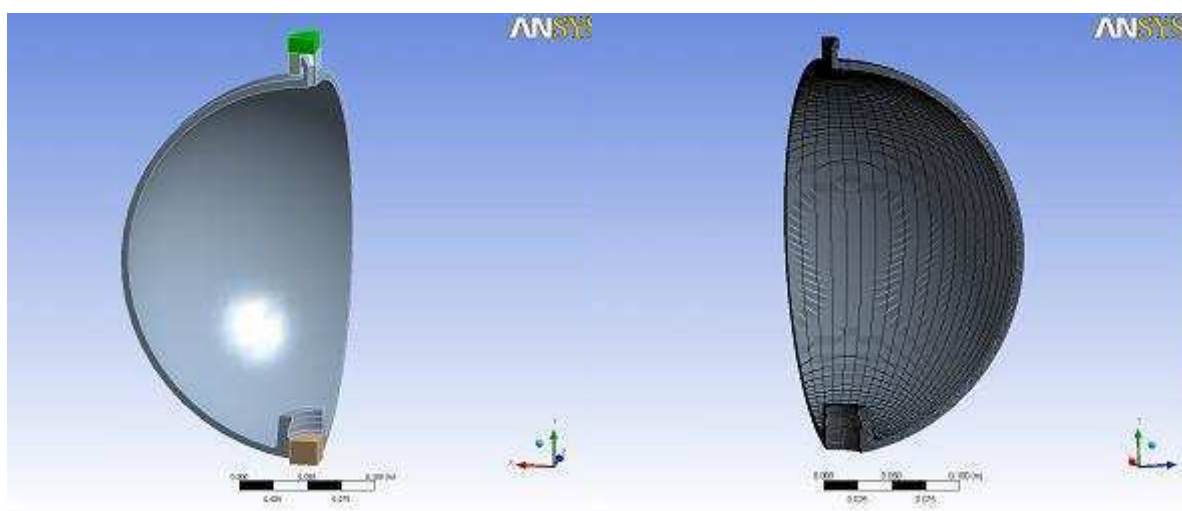
##### a) Model i właściwości mechaniczne

Materiał: stop BT6 wg GOST (Ti6Al4V wg ASTM). Dane wejściowe użyte do obliczeń MES zawiera Tabela 8.

Przyłożone obciążenie, ciśnienie  $p = 55 \text{ MPa}$ .

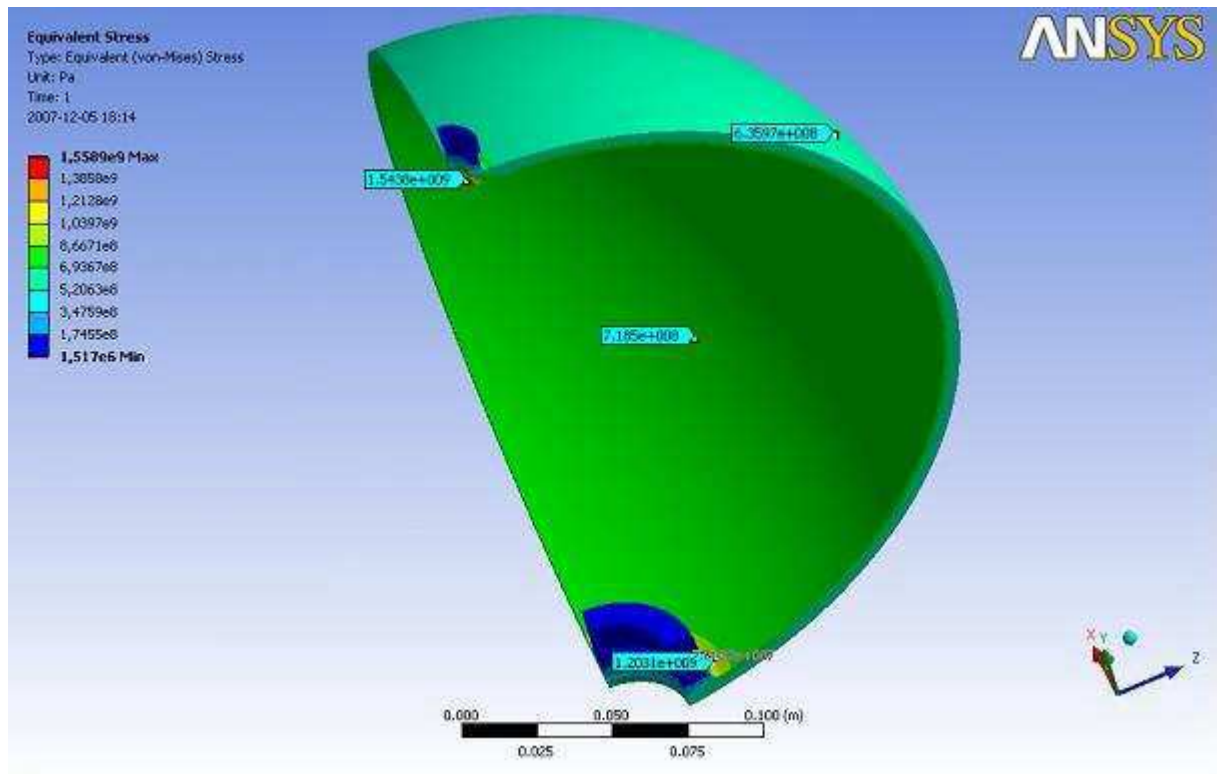
Tabela 8

Structural	
Współczynnik Young'a	9,6e+010 Pa
Współczynnik Poisson'a	0,36
Gęstość	4620, kg/m <sup>3</sup>
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	9,4e-006 1/°C
Granica plastyczności	9,3e+008 Pa
Moduł umocnienia	1,07e+009 Pa

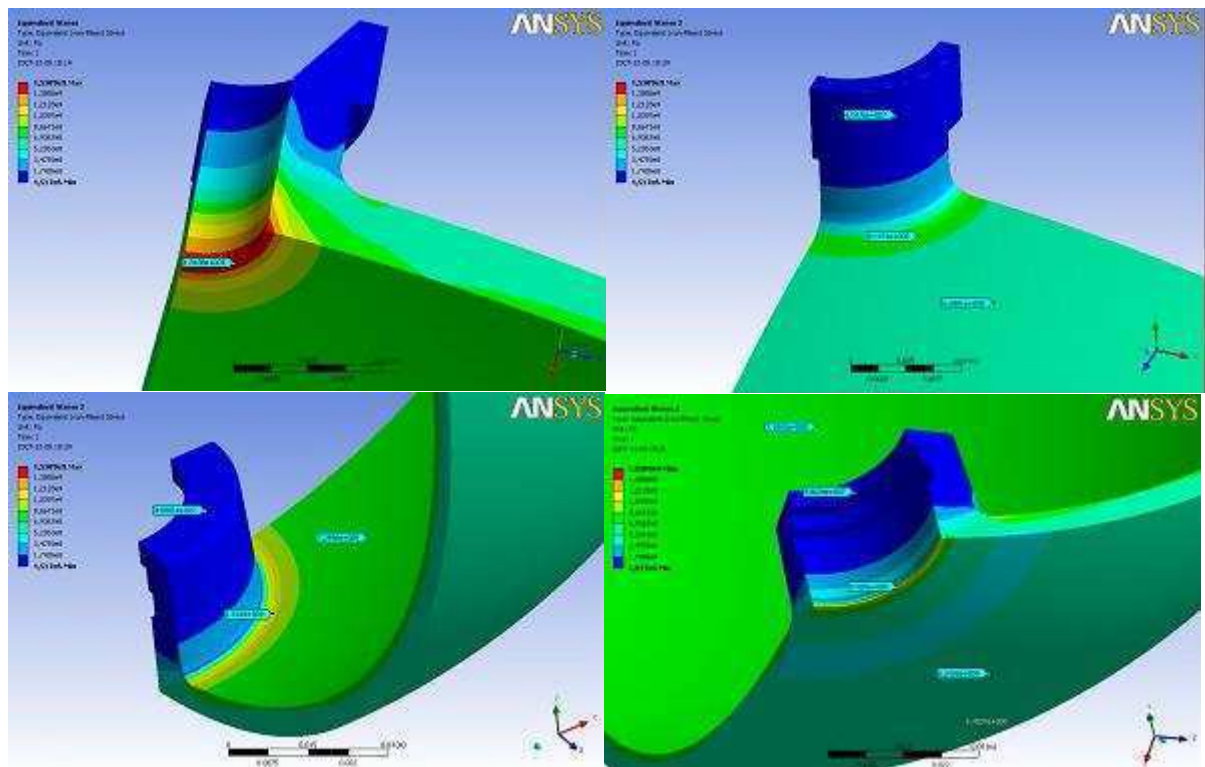


Rys.30. Analizowany model; geometryczny i numeryczny





Rys.31. Wyniki rozkładu naprężeń na płaszczu zbiornika



Rys.32. Wyniki rozkładu naprężeń na płaszczu i króćcach zbiornika.

**Tabela 9. Właściwości mechaniczne badanego stopu (wg ASTM)**

Granica plastyczności	1103 MPa
Wytrzymałość na rozciąganie	1172 MPa

Określenie współczynnika bezpieczeństwa dla zbiornika powietrza 75-8720

Współczynnik bezpieczeństwa  $k$  określono jako stosunek granicy plastyczności  $R_e=1103$  MPa do naprężeń zredukowanych, które wynoszą 718 Mpa.

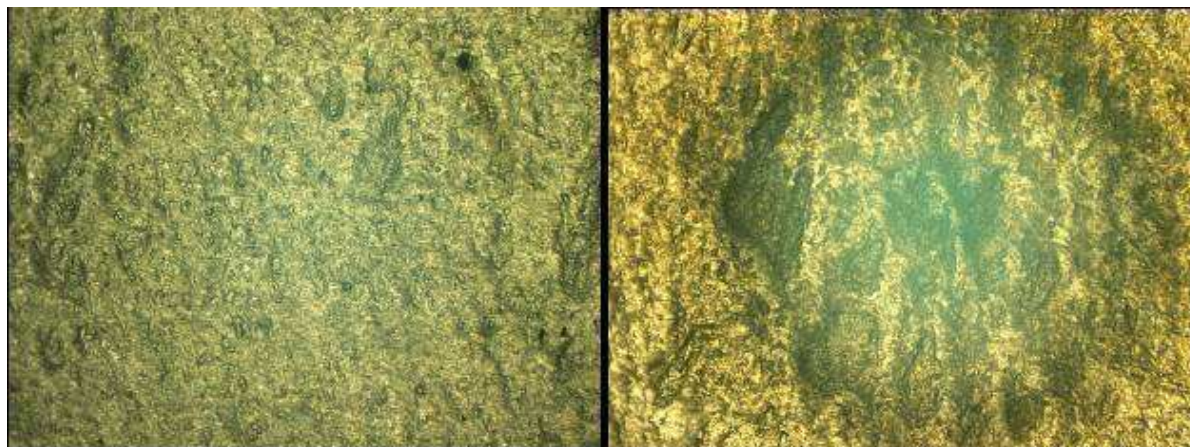
$$k = 1,536$$

**Badanie wycinka K17**

Celem badania było określenie przyczyny powstania ciemnego „zanieczyszczenia” na powierzchni wewnętrznej zbiornika.

Wstępnie dokonano oględzin wizualnych, a następnie oględzin przy wykorzystaniu mikroskopu metalograficznego Keyence VHX 100K. Stwierdzono liczne ślady zanieczyszczeń wykonywanych w zakładzie produkcyjnym, najprawdopodobniej produktów z wykonywanej spoiwy. Nie stwierdzono ognisk, ani śladów korozji.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że „zanieczyszczenie” to powstało w trakcie spawania zbiornika. Nadmiar spoiwa użytego w trakcie spajania materiału spadł na powierzchnię zbiornika pozostawiając kolisty ślad. Świadczą o tym widoczne utlenienia powierzchni wokół ciemnych obszarów (powstałe na skutek oddziaływania wysokiej temperatury), jak również ich kolory od różowego do zielonego. To z kolei mówi o grubości tlenku w obserwowanym obszarze (Rys.32).



**Rys.32. Powierzchnia zbiornika i „zanieczyszczenie”. Pow. 100x.**

**4. Wnioski**

1. W wyniku przeprowadzonego przeglądu zewnętrznego zbiorników stwierdzono dobry stan ich powierzchni zewnętrznych i połączeń gwintowanych, nie zaobserwowano śladów korozji. Połączenia spawane wszystkich zbiorników bez widocznych wad i uszkodzeń,

kształt lica spoiny prawidłowy. Wszystkie zbiorniki posiadały tabliczkę znamionową z podstawowymi danymi identyfikacyjnymi oraz wpisana adnotacją o przeprowadzonej wytrzymałościowej próbie ciśnieniowej.

2. W wyniku badań ultradźwiękowych stwierdzono:
  - grubość ścianek zbiorników zawiera się w granicach od 5,5, do 6,2mm;
  - materiał ścianek zbiorników w sąsiedztwie spoiny nie wykazuje rozwarstwień ani innych wad materiałowych;
  - badane spoiny spełniają wymagania najwyższej klasy jakości B wg PN-EN ISO 5817 – wymagania ostre.
3. Na podstawie badań endoskopowych stwierdzono:
  - brak śladów korozji na wewnętrznych ściankach zbiorników i połączeniach spawanych;
  - dobrą jakość połączeń spawanych - wprawdzie występują lokalne zniekształcenia grani, ale przetop jest pełny;
  - liczne ślady zczyszczeń na powierzchni wewnętrznej – z miejsca tego pobrano wycinek K19;
  - charakterystyczne, punktowe wtrącenia w okolicy spoiny obwodowej, skąd pobrano wycinek K17 do dalszych badań materiałowych.
4. Na podstawie hydraulicznej próby wytrzymałościowej na ciśnienie 1,5 maksymalnego ciśnienia roboczego, tj. 55,5 MPa, stwierdzono, że wszystkie zbiorniki przeszły ją z wynikiem pozytywnym.
5. Hydrauliczne badania wytrzymałościowe z pomiarem sygnałów emisji akustycznej (EA), pozwalające na ujawnienie ewentualnych wad materiałowych oraz obserwację ich rozwoju wraz ze wzrostem obciążenia, wykazały obecność źródła sygnałów EA w okolicy korka technologicznego. W celu lokalizacji źródła sygnałów pobrano do badań materiałowych wycinki K12, K13 i K14.
6. Powierzchnie płaszcza zbiornika bez śladów i ognisk korozji, powierzchnia wewnętrzna gładka i błyszcząca, z widocznymi śladami zczyszczenia mechanicznego. W wyniku analizy składu chemicznego stwierdzono, że materiałem użytym do wykonania zbiorników jest stop tytanu BT6 wg GOST. Badania wizualne i mikrostruktura materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła i spoiny wskazują, że spoina jest wykonana prawidłowo i jest typowa dla stopu BT6, lico spoiny łączące obie półkule zbiornika wykonano poprawnie, nie zauważono żadnych wad spawalniczych. Połączenie gwintowe (wycinek K12) pomiędzy korkiem a płaszczem zbiornika wykazuje nadmierne luzy, co mogło być źródłem sygnałów EA.
7. W wyniku obliczeń wytrzymałościowych zbiornika obciążonego ciśnieniem 55MPa stwierdzono, że współczynnik bezpieczeństwa wynosi  $k=1,536$ , przy granicy plastyczności 1103 MPa i naprężeniach zredukowanych, odpowiadających ciśnieniu 55MPa, równym 718MPa. Wszystko wskazuje zatem na to, że źródłem sygnałów EA było połączenie gwintowe korka zbiornika z jego płaszczem.
8. Zbiorniki, mimo długotrwałej eksploatacji są w dobrym stanie technicznym. Użyty do ich wykonania stop tytanu BT6 posiada wysoką wytrzymałość, pozwalającą na uzyskanie współczynnika bezpieczeństwa wyższego od 1,5 przy obciążeniu go ciśnieniem 55MPa.

## Literatura

- [1]. Materiały archiwalne WITU- niepublikowane
- [2]. PN-EN 13018:2004 "Badania nieniszczące. Badania wizualne. Zasady ogólne"

- [3] PN-EN 1330-10:2004 "Badania nieniszczące. Terminologia. Część 10: Terminy stosowane w badaniach wizualnych"
- [4] PN-EN 437:2002 "Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących. Zasady ogólne".

## **COMPLEX TESTS OF HIGH PRESSURE AIR CYLINDERS AFTER LONG TERM USING**

**Abstract:** Some selected methods and results of tests on the high pressure air spherical cylinders used in anti-aircraft missiles are presented in the paper. The method of visual inspection, acoustic emission, ultrasound, endoscopy and material testing applied to the material of cylinder itself and anticorrosive coating and welded and threaded joints is described. Testing methods with the instrumentation and testing equipment are presented both with the description of testing conditions and results. Presented testing methods provide possibilities for assessment of technical status of missiles after long term service. The aim of these tests is to provide the safe life time of missiles after the time when the manufacturer's technical warranty period had expired.