



## MODELOWANIE I ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA ZBIORNIKA DO TRANSPORTU PRZEDMIOTÓW ZAWIERAJĄCYCH MATERIAŁY WYBUCHOWE

### *MODELING AND STRENGTH ANALYSIS OF A VESSEL FOR TRANSPORTING EXPLOSIVE MATERIALS*

Piotr KRYSIAK, Marcin SZCZEPANIAK, Janusz ŚLIWIŃSKI,  
Andrzej WOJCIECHOWSKI, Patrycja WOJCIESZYŃSKA  
Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej  
*Military Institute of Technical Engineering*

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono obliczenia oraz model rzeczywisty zbiornika do transportu przedmiotów zawierających materiały wybuchowe. Zbiornik wykonano w dwóch wersjach wyposażenia. Na wstępie wyznaczono graniczną wartość ciśnienia na czole fali uderzeniowej, pochodzącą od detonacji we wnętrzu zbiornika ładunku o masie 1 kg TNT. Następnie wykonano analityczne obliczenia wyężenia korpusu pojemnika. W celu weryfikacji poziomu naprężeń, na powierzchniach elementów konstrukcyjnych naklejono czujniki tensometryczne. W kolejnej fazie przeprowadzono badania doświadczalne na poligonie, poprzez zdetonowanie we wnętrzu zbiornika 1 kg TNT. Podczas badań wykonywano pomiary odkształceń. Analizę danych zmierzonych przedstawiono na wykresach w postaci rozkładu naprężeń w funkcji czasu.

**Słowa kluczowe:** zbiornik przeciwybuchowy, ładunek TNT, analiza wytrzymałościowa

### 1. Wstęp

Aktualnie w świecie produkuje się wiele rodzajów pojemników do przewożenia przedmiotów, np. amunicji, niewypałów i niewybuchów zawierających materiały wybuchowe o masie od kilkuset gram do kilkudziesięciu kilogramów. Pojemniki ww. zapewniają bezpieczeństwo osób transportujących przedmioty zawierające materiał wybuchowy, jak również ludzi mogących się znaleźć w pobliżu przejazdu lub składowania, w przypadku wystąpienia niezamierzonej (przy-

**Abstract:** The paper presents calculations and a real model for a vessel transporting goods with explosive materials. Two options of the vessel were fabricated. An extreme value of pressure at the blast wave-front generated by the explosion of 1 kg TNT inside the vessel was determined at the beginning. Then analytical calculations of stress values for vessel frame were conducted. In order to verify the stress level, strain gauges have been attached to the surface of structural members. In the next stage experimental tests were conducted on the proving ground by explosion of 1 kg of TNT inside the vessel. Deformations were measured at the tests. An analysis of measured data is illustrated in diagrams of stress distribution versus time.

**Keywords:** blast-containment vessel, TNT charge, strength analysis

### 1. Introduction

Currently there are many vessels manufactured in the world to transport goods, e.g. ammunition, duds and not exploded munitions, containing explosive materials with the mass of a few hundred grams to a few dozen kilograms. Containers mentioned above have to provide the safety both for persons transporting the articles with explosive material and those who would be in the vicinity of

padkowej) detonacji materiału wybuchowego znajdującego się wewnątrz. Wynika z tego fakt, że po detonacji materiału wybuchowego, pojemnik powinien uniemożliwić „rozlot” odłamków (np. z obudowy przewożonych min przeciwpiechotnych) oraz odpowiednio ukierunkować wylot gazów powybuchowych.

Obecnie na świecie istnieje wiele terenów objętych konfliktami zbrojnymi. Występują również tereny, na których konflikty zbrojne zostały zakończone w minionych latach. Dlatego zachodzi konieczność oczyszczania tych terenów z przedmiotów zawierających materiały wybuchowe po zakończonych działaniach militarnych i przystosowaniu ich do działań cywilnych.

Wobec powyższych wymagań oraz potrzeb o charakterze cywilnym i militarnym w Wojskowym Instytucie Techniki Inżynierskiej wykonano model pojemnika na podstawie oszacowanych parametrów geometrycznych oraz zmierzono doświadczalnie poziom wyężenia konstrukcji po wybuchu 1 kg trinitrotoluenu (TNT) w warunkach poligonowych.

Pojemnik wykonano w dwóch wariantach wyposażenia. W wariantcie nr 1 wewnątrz kadłuba pojemnika, na jego obwodzie oraz w dolnej części zostały zamontowane elementy rozpraszające energię wybuchu materiału wybuchowego. Na obwodzie zostały rozmieszczone deski drewniane, które połączone ze sobą za pomocą taśm gumowych. W dolnej części pojemnika osadzona została podłoga drewniana, na której ułożono wykładzinę elastomerową. W środkowej części pojemnika znajduje się wkład ze styropianu, w którym wykonano wnękę i zakryto pokrywą drewnianą. Wnęką służy do umieszczenia w niej wyrobów zawierających materiał wybuchowy.

Wersja nr 2 różni się od wersji nr 1 tym, że ładunki wybuchowe zostały umieszczone na podłodze drewnianej w środkowej części zbiornika, natomiast przestrzeń pod podłogą zalano wodą, która służy do wytłumienia fali uderzeniowej oraz wygaszenia efektów wybuchu i ewentualnego zapłonu elementów znajdujących się we wnętrzu pojemnika.

## 2. Obliczenia analityczne

W celu oszacowania poziomu obciążenia, jakiemu poddana jest konstrukcja zbiornika podczas wybuchu, przeanalizowano oddziaływanie fali uderzeniowej w jego wnętrzu.

transported or stored material in case of its unintentional (casual) explosion. It comes from the above that after explosion the container has to prevent any spreading of fragments (e.g. from the cases of transported antipersonnel mines) and to direct suitably explosive gases.

There are a lot of places in the world now with military conflicts. Moreover there are some places where the military conflicts have been recently terminated. Then it is necessary to clean these places from explosive articles left after military operations and adapt them to civilian use.

Facing the above military and civilian demands and requirements the Military Institute of Technical Engineering has developed a model of the vessel based on estimated geometrical parameters and has performed experimental measurements of stress levels for the design by detonation of 1 kg of trinitrotoluene (TNT) in field conditions.

The vessel was fabricated and fitted in two options. In the first option inside the vessel frame are components fixed on its perimeter and in the bottom part for scattering the energy of explosion. Wooden planks were placed on the perimeter and joined by rubber straps. A wooden floor covered by an elastomeric liner was fixed in the bottom of the vessel. The central part of the vessel is lined with Styrofoam including an empty space covered by a wooden covering. The space is designated for goods containing explosive material.

In the second option the explosive charges were put on the wooden floor placed in the middle of the vessel whereas the space below the floor was filled with water. The water is used to absorb the blast wave and extinguish the effects of explosion and possible ignition of components included inside the vessel.

## 2. Analytical Calculations

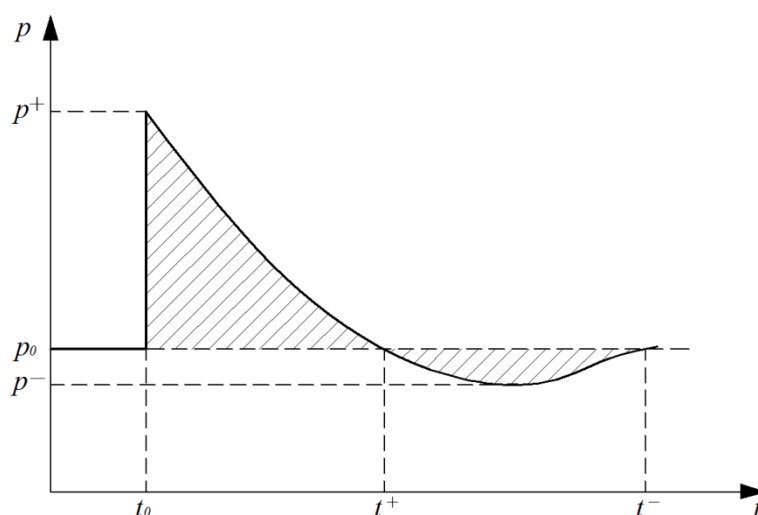
The action of a blast wave generated inside the vessel was analysed to estimate the level of straining that affects its structure during explosion.

Fala uderzeniowa powstaje w wyniku procesu detonacji materiału wybuchowego. W trakcie tego procesu wokół źródła wybuchu tworzy się strefa nagranych produktów gazowych o ciśnieniu znacznie przewyższającym wartości ciśnienia panującego w środowisku przed detonacją. Gazy te poruszając się z prędkością ponaddźwiękową, rozprzestrzeniają się w kierunku od centrum wybuchu w postaci fali o wysokiej temperaturze, gęstości i ciśnieniu. Za czołem fali uderzeniowej następuje rozprężenie produktów gazowych powodując łagodny spadek ich ciśnienia, a w konsekwencji do znacznego obniżenia ich prędkości [1].

Modelowy przebieg wyżej opisanego procesu przedstawiono na rysunku 1 [2].

The blast wave is generated as a result of an explosion process. In the process of explosion around its source a zone of hot gaseous products with much higher pressure than before the explosion is created. The gases move with hypersonic velocity outside from the centre of explosion in the form of the wave possessing high temperature, density and pressure. Behind the front of blast wave the gaseous products are decompressed smoothly what in consequence reduces significantly their velocity [1].

A model of the above process is presented in figure 1 [2].



**Rys. 1. Przebieg impulsu ciśnienia fali uderzeniowej**

$p^+$  – maksymalna wartość ciśnienia na czole fali uderzeniowej,  $p^-$  – minimalna wartość ciśnienia na czole fali uderzeniowej,  $p_0$  – ciśnienie otoczenia (ośrodka niezaburzonego),  
 $t^+$  – czas trwania nadciśnienia fali uderzeniowej,  $t^-$  – czas trwania podciśnienia fali uderzeniowej

**Fig. 1. Diagram for pressure pulse of blast wave**

$p^+$  – Maximal value of pressure on the blast wave front,  $p^-$  – Minimal value of pressure on the blast wave front,  $p_0$  – Ambient pressure (undisturbed ambience),  $t^+$  – Blast wave overpressure time,  $t^-$  – Blast wave suppression time

W celu wyznaczenia parametrów wybuchu dla określonego przypadku, wykonano schemat układu do obliczeń (rys. 2) według założeń projektowych.

W celu obliczenia wartości nadciśnienia na czole fali uderzeniowej  $p^+$  oraz czasu jej trwania  $t^+$  wykorzystano następujące zależności [3]:

In order to calculate characteristics of explosion for a specific case a system outline (Fig. 2) was prepared according to designing assumptions.

In order to calculate the pressure building up  $p^+$  on front of the blast wave and its duration time  $t^+$  following relations were used [3]:

$$t^+ = 0,41(\eta E)^{1/6} R^{1/2} \text{ dla } 0,0835 \leq \bar{R} \leq 0,7 \quad (2)$$

gdzie:

$t^+$  – czas trwania nadciśnienia fali uderzeniowej;

where:

$t^+$  – blast wave overpressure duration time;

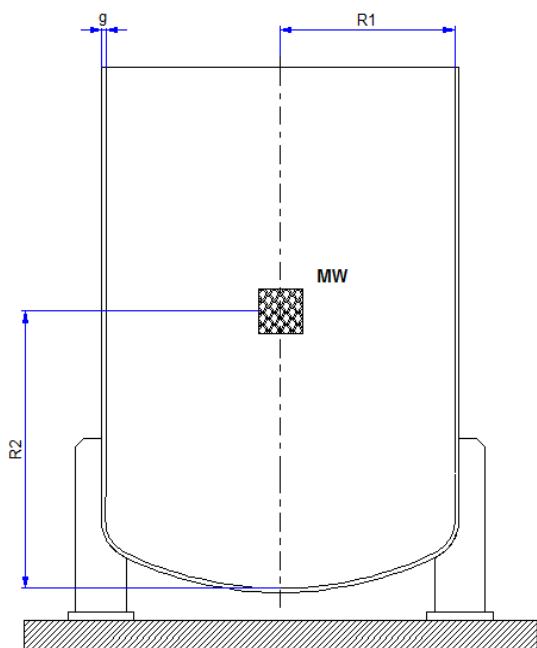
$\eta$  – współczynnik wykorzystania energii wybuchu; dla silnych jednorodnych materiałów wybuchowych  $\eta = 0,66$  [4];

$R$  – odległość od centrum wybuchu;

$\bar{R}$  – odległość zredukowana;  $\bar{R} = \frac{R}{m^{1/3}}$  [1],

gdzie:

$m$  – masa ładunku wybuchowego



Znając maksymalne nadciśnienie panujące w zbiorniku podczas wybuchu, można oszacować naprężenia w konstrukcji. Dla stali S355 (grubość 10 mm) wg normy EN 10025-2:2004 [5]:

- granica plastyczności  $Re = 355$  MPa;
- wytrzymałość na rozciąganie  $Rm = 470-630$  MPa.

Maksymalne naprężenie obwodowe w konstrukcji kadłuba pojemnika  $\sigma_{\max}$ , wyznaczono z następującej zależności:

$$\sigma_{\max} = p^+ \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( \frac{r_2^2}{r_1^2} + 1 \right) \quad (3)$$

gdzie:

$r_1$  – promień wewnętrzny zbiornika,

$r_2$  – promień zewnętrzny zbiornika.

Na podstawie powyższych wzorów wykonano obliczenia, a uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

$\eta$  – coefficient of efficiency for energy of explosion; for powerful homogeneous explosives  $\eta = 0.66$  [4];

$R$  – distance from the centre of explosion;

$\bar{R}$  – reduced distance;  $\bar{R} = \frac{R}{m^{1/3}}$  [1],

where:

$m$  – mass of explosive charge

**Rys.2. Schemat pojemnika przyjęty do obliczeń wytrzymałościowych**

**Fig. 2. Outline of the container taken for strength calculations.**

Knowing maximal overpressure inside the container during explosion the structure stress level may be estimated. For steel S355 (thickness of 10 mm) according to standard EN 10025-2:2004 [5]:

- Plasticity limit  $Re = 355$  MPa;
- Tensile strength  $Rm = 470-630$  MPa.

Maximal perimeter stress for the container frame structure  $\sigma_{\max}$  was determined from following formulae:

where:

$r_1$  – container internal radius,

$r_2$  – container external radius.

Calculations were performed basing on the above formula and received results are presented in table 1.

Tabela 1. Obliczone parametry fali uderzeniowej oraz maksymalnych naprężeń obwodowych

Table 1. Calculated parameters of blast wave and maximal perimeter stresses

Nr obliczenia <i>Calculation No</i>	Odległość od centrum wybuchu <b>R [m]</b> <i>Distance from the centre of explosion</i>	Maksymalne nadciśnienie <b>p<sup>+</sup> [MPa]</b> <i>Maximal overpressure</i>	Czas trwania nadciśnienia <b>t<sup>+</sup> [ms]</b> <i>Overpressure duration time</i>	Maksymalne naprężenia obwodowe <b>σ<sub>max</sub>[MPa]</b> <i>Maximal perimeter stresses</i>
1	0,4	6,81	3,1	275,8
2	0,55	2,62	3,6	145,4

Analizując wyniki przeprowadzonych obliczeń widać, że dla założonej geometrii pojemnika, maksymalne naprężenia w konstrukcji są poniżej wartości granicy plastyczności (355 MPa) i mają prawie dwukrotnie mniejszą wartość niż granica wytrzymałości (630 MPa). Oznacza to, że pojemnik nie powinien odkształcić się plastycznie, (mimo, że jest to dopuszczalne, ponieważ pojemnik jest jednorazowego użytku).

W rzeczywistości naprężenia obwodowe powinny być nieco niższe niż otrzymane z obliczeń, ze względu na częściowe rozproszenie energii wybuchu przez elementy konstrukcyjne umieszczone wewnątrz kadłuba (drewno, guma, styropian, woda), bezwładność kadłuba (pobocznicy) pojemnika oraz krótki czas trwania obciążenia.

Z drugiej zaś strony rzeczywiste naprężenia obwodowe mogą być wyższe od tych obliczonych ze względu na występujące w konstrukcji kontakty, tzn. interakcja elementów umieszczonych na obwodzie wewnątrz pojemnika z jego pobocznica podczas wybuchu może spowodować powstanie znacznych naprężeń lokalnych. W modelu obliczeniowym pominięto ten fakt, ponieważ trudno byłoby uwzględnić te wszystkie parametry w sposób analityczny. Dlatego w kolejnej części opracowano model rzeczywisty i przeprowadzono na nim badania.

### 3. Badania doświadczalne pojemnika

Badania doświadczalne pomiaru wyężenia elementów konstrukcji zbiornika wykonano na poligonie doświadczalnym na specjalnie przygotowanym stanowisku badawczym.

Pomiary naprężeń (odkształceń) elementów konstrukcyjnych pojemnika mających wpływ na bezpieczeństwo jego eksploatacji oraz pomiary naprężeń w ramie, na której

Analysing results of calculations it is clearly seen that, for the assumed geometry of container, the maximal stresses of structure are below the plasticity limit (355 MPa) and almost two times less than the strength limit (630 MPa). It means that the vessel will not be subjected to any plastic deformation (even though it is acceptable as it is a disposable unit).

In reality the perimeter stresses have to be a bit lower than those received from calculations because of a partial dissipation of explosion energy by structural members placed inside the frame (wood, rubber, Styrofoam, water), inertia of vessel frame (sidewalls) and short duration time of the stressing.

On the other side the real perimeter stresses may be higher than calculated because of contact zones existing in the design i.e. components placed inside the vessel perimeter interact with the sidewall at the explosion and may cause significant local strains. The above model of calculation omits this fact as it would be difficult to consider all parameters analytically. For this reason a real model was prepared for testing.

### 3. Experimental Tests of the Vessel

Experimental tests and measurements of stressing for structural members were carried out on the proving ground by using a specially prepared set-up.

The strains (deformations) of structural members of the container which affect the safety of its use and the strains of the mounting frame on which it was built were

został posadowiony, przeprowadzono metodą tensometrii oporowej. Tensometry naklejono odpowiednio na powierzchni zewnętrznej pojemnika, na elementach ramy oraz na śrubach mocujących jego pokrywę.

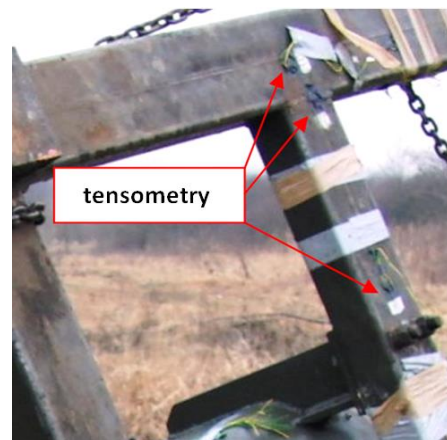
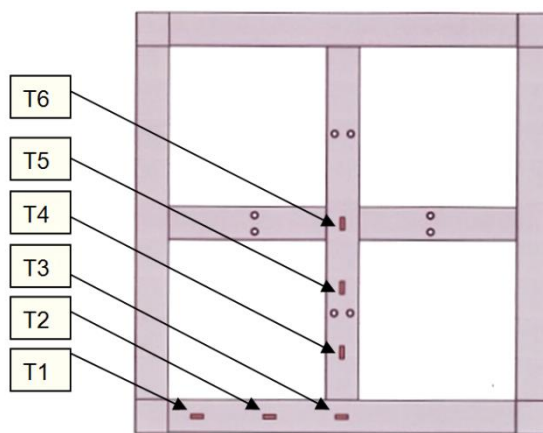
Na elementach konstrukcyjnych naklejono łącznie 16 czujników tensometrycznych (rys. 3 - 5), z czego:

- T1, T2, T3, T4, T5, T6 – czujniki umieszczone na elementach podstawy (rys. 3);
- T7, T9, T11, T12, T14, T16 – czujniki umieszczone na poboczniczy pojemnika (obwodowo) (rys. 4);
- T8, T10, T13, T15 – czujniki umieszczone na śrubach mocujących pokrywę (rys. 5).

measured by a resistant tensiometer method. Tensiometers were respectively stuck on external surface of the container, on components of the mounting frame and on the bolts which fix the cover.

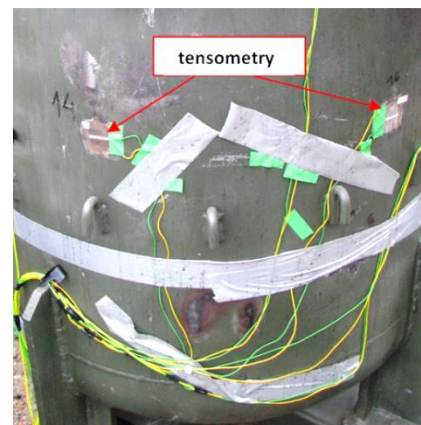
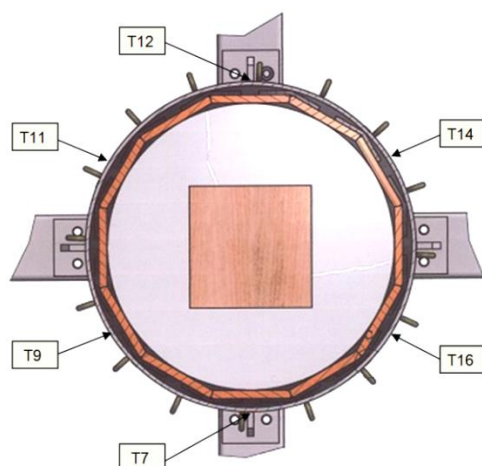
Totally 16 tensiometer sensors were stuck on structural members (Fig. 3 - 5) where:

- T1, T2, T3, T4, T5, T6 – sensors placed on parts of the base (Fig. 3);
- T7, T9, T11, T12, T14, T16 – sensors placed on container sidewall (in perimeter) (Fig. 4);
- T8, T10, T13, T15 – sensors placed on cover fixing bolts (Fig. 5).



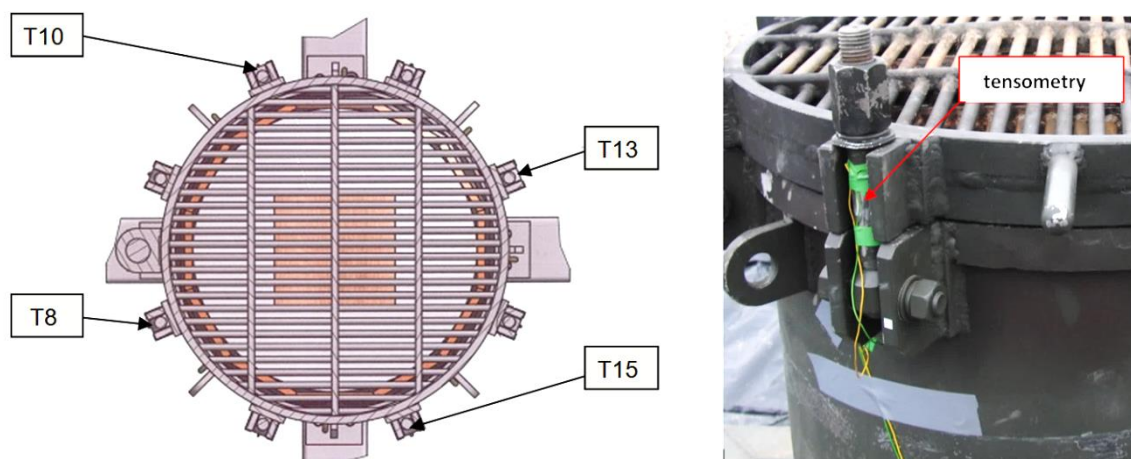
**Rys. 3. Tensometry umieszczone na podstawie pojemnika; schemat rozmieszczenia (z lewej) oraz widok (z prawej)**

*Fig. 3. Tensiometers placed on the vessel base; distribution (left) and picture (right)*



**Rys. 4. Tensometry umieszczone obwodowo na poboczniczy pojemnika; schemat rozmieszczenia (z lewej) oraz widok (z prawej)**

*Fig. 4. Tensiometers placed in perimeter wall of the vessel; distribution (left) and picture (right)*



**Rys. 5. Tensometry umieszczone na śrubach pokrywy pojemnika; schemat rozmieszczenia (z lewej) oraz widok (z prawej)**

**Fig. 5. Tensimeters placed on vessel cover bolts; distribution (left) and picture (right)**

Do obserwacji właściwości i efektów oddziaływania fali uderzeniowej podczas wybuchu, takich jak: kształt czoła fali, jej odbicia, rozłot efektów detonacji, zapłon elementów wygłuszenia oraz zachowanie się całej konstrukcji w krótkim czasie wybuchu, wykorzystano ultraszybką kamerę optyczną PHANTOM V711 firmy Vision Research.

Ładunek wybuchowy użyty do badań zawierał materiał wybuchowy w postaci trotylu prasowanego o sumarycznej masie 1,0 kg i elementy odłamkowe w ilości około 2200 szt., w postaci stalowych kulek łożyskowych o średnicy  $\varnothing$  6mm. Ładunek został wykonany z 11szt. naboju wiertniczych walcowych o masie 75g i 1 szt. kostki trotylu o masie 200g.

Przed umieszczeniem ładunku wybuchowego w pojemniku przeciwwybuchowym, w gniazdach naboju wiertniczych i w kostce trotylu osadzono zapalniki elektryczne typu ERG, których przewody połączono szeregowo i podłączono do zapalarki elektrycznej TZK-100A.

W kolejnych rozdziałach opisano wyniki badań dla poszczególnych wersji wyposażenia pojemnika.

### 3.1. Badania wytrzymałościowe pojemnika w wersji 1

Pojemnik ustawiono na stanowisku badawczym. Po podłączeniu aparatury pomiarowej, ładunki wybuchowe umieszczono w pojemniku i zdetonowano. Efekt wybuchu powstały podczas badania oraz rozkład fali

The blast wave properties such as its front shape and reflections, spreading of fragments, and ignition of absorbing components and whole structure behaviour at short time explosion were observed by ultra-high-speed optical camera PHANTOM V711 of Vision Research.

Explosive charge used for tests was made of pressed trotyl with total mass of 1.0 kg and fragments in amount of ca. 2200 items in the form of bearing balls of 6.0 mm diameter. The charge was made from 11 cylindrical drilling shots each with the mass of 75g and one trotyl slab of 200 g.

Before placing the explosive charge into anti-explosive vessel the electric ERG igniters were put in the hollows of drilling shots and trotyl slab and their cables were wired in series and connected to electric ignition apparatus TZK-100A.

The results of tests for particular options of container fittings are described in next chapters.

### 3.1. Strength Tests for Option 1 Container

The container was placed on a testing set-up. After connecting the measurement instruments the explosive charges were put into the container and detonated. Results of the explosion and distribution of blast wave are presented in Fig. 6. The

uderzeniowej przedstawiono na rys. 6. Na ostatniej klatce (licząc od lewej) widać, że elementy wewnętrzne w postaci absorberów energii (deski, guma) uległy zapaleniu; ogień utrzymywał się przez kilka minut.

last frame (counting from the left) shows that internal components in the form of energy absorbers (planks, rubber) have got the fire; the fire has lasted for a few minutes.



**Rys. 6. Obrazy zarejestrowane przez kamerę podczas badań**

*Fig. 6. Pictures recorded by camera during tests*

Po badaniach stwierdzono lokalne odkształcenia pobocznicy pojemnika w dwóch miejscach jego części środkowej, odkształcenie części cylindrycznej oraz nieznaczne odkształcenie pokrywy (rys. 7).

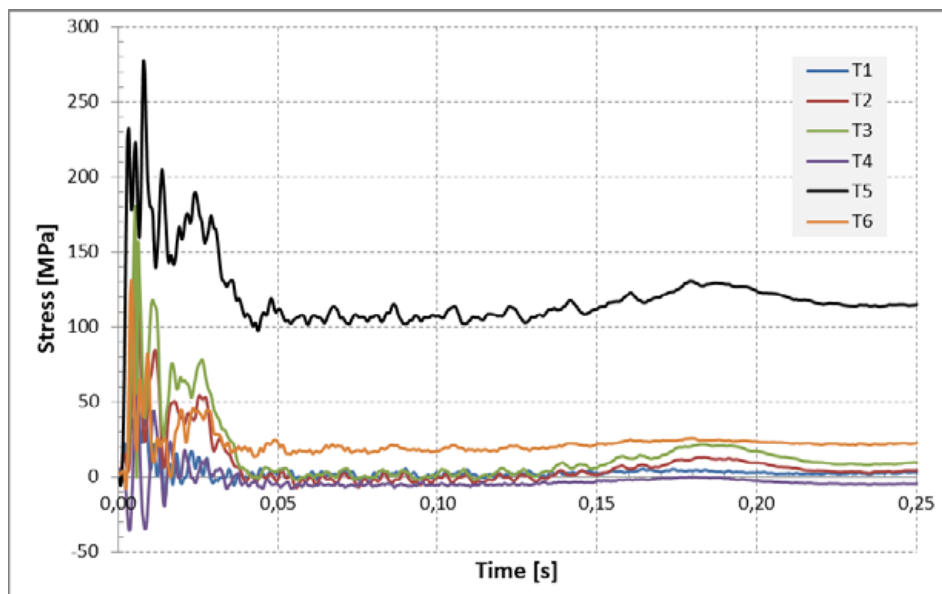
Two local deformations of container side wall on its middle part and a deformation of cylindrical part and an insignificant deformation of the cover were noticed after tests (Fig. 7).



**Rys. 7. Widok zbiornika po badaniach.**  
Zaznaczono widoczne odkształcenia pobocznicy (z lewej)

*Fig. 7. View of the container after tests.*  
*Visible deformations of side wall are marked (on the left)*





**Rys. 8. Wartości naprężeń w elementach podstawy**

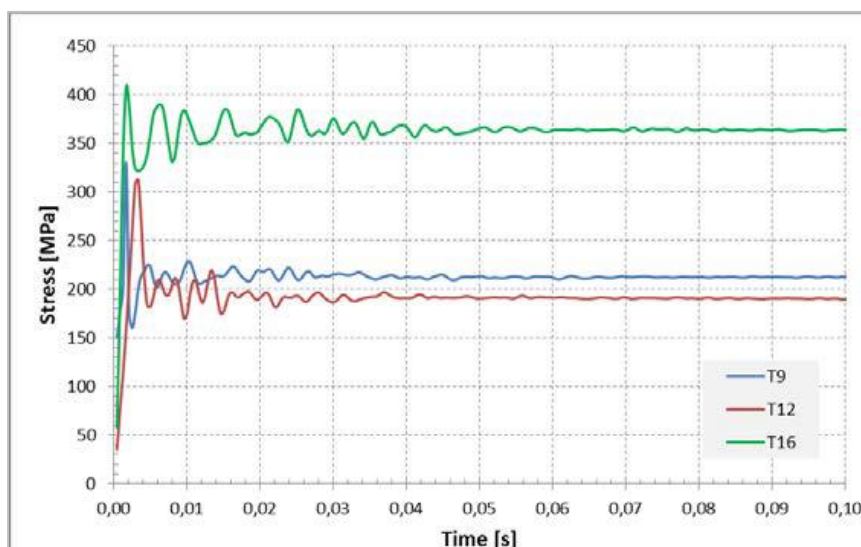
*Fig. 8. Values of strains for components of base*

Po badaniach stwierdzono, że przyczyną odkształcenia pobocznicy pojemnika w dwóch miejscach było uderzenie obudowy kostki 200gTNT, która po detonacji rozdzieliła się na dwie części. Z kolei odkształcenie pokrywy pojemnika spowodowane było oddziaływaniem impulsu ciśnienia fali uderzeniowej.

Na rysunkach 8÷10 podane są wartości naprężeń, wynikających z odkształceń elementów konstrukcji zarejestrowanych podczas badań.

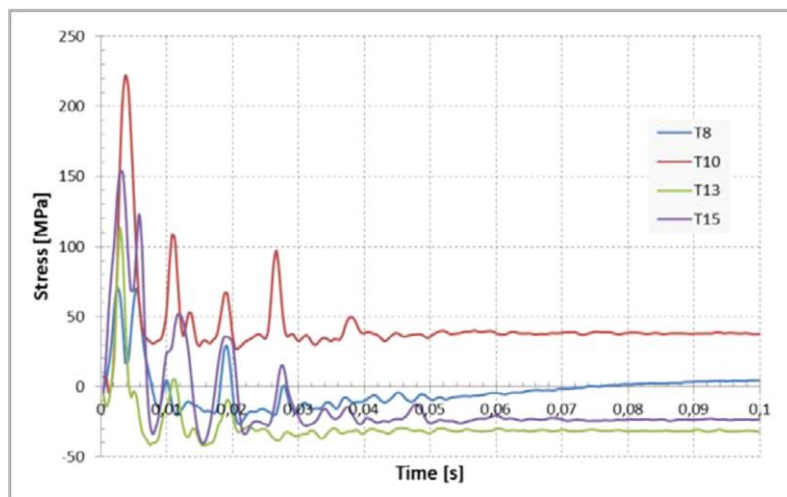
After tests it proved that deformation of the side wall in two places was caused by the hitting of a case of 200 g TNT slab that separated on two parts. Deformation of container cover was caused by the action of blast wave pressure pulse.

Diagrams (Fig. 8 – 10) show values of strains recorded at tests and caused by deformations of structural members.



**Rys. 9. Wartości naprężeń na pobocznicy zbiornika**

*Fig. 9. Values of strains on the container side wall*



**Rys. 10. Wartości naprężeń na śrubach pokrywy**

**Fig. 10. Values of strains for the bolts of cover**

Na wykresach widać, że maksymalne naprężenia zarejestrowane podczas badań wynoszą:

- 277 MPa – na belce podstawy;
- 408 MPa – na pobocznicy zbiornika;
- 222 MPa – na śrubie pokrywy.

Mając na uwadze fakt, że wszystkie elementy zostały wykonane ze stali konstrukcyjnej S355, zbiornik wytrzyma założone obciążenie, co zostało potwierdzone podczas badań (konstrukcja nie uległa uszkodzeniu).

Naprężenia na pobocznicy przekraczają wartości zakresu granicy plastyczności  $\sigma \geq 355 \text{ MPa}$  (zbiornik odkształcił się trwale), ale mieszczą się w zakresie granicy wytrzymałości  $\sigma \leq 470 \div 630 \text{ MPa}$ . Na rys. 9 pokazano wyniki z trzech tensometrów, ponieważ pozostałe trzy uległy uszkodzeniu podczas wybuchu. Na wykresie widoczna jest również duża różnica między wskazaniem czujników rozmieszczonych po przeciwnych stronach na obwodzie zbiornika. Jest to prawdopodobnie spowodowane niesymetrycznym rozkładem fali wybuchowej podczas detonacji.

### 3.2. Badania wytrzymałościowe pojemnika w wersji 2

Pojemnik ustawiono na stanowisku badawczym. Po podłączeniu aparatury pomiarowej, ładunki wybuchowe umieszczono w pojemniku i zdetonowano. Na rys. 11 przedstawiono kolejno zarejestrowane klatki filmu od inicjacji ładunku MW aż do jego zakończenia.

The diagrams show that the maximal strains recorded at tests are:

- 277 MPa – on the base beam;
- 408 MPa – on container side wall;
- 222 MPa – on the cover bolt.

Components of the container were made from the structural steel S355 to withstand the assumed level of stressing what was confirmed by tests (the structure was not destroyed).

The strains on the side wall exceeded the values of plasticity limit  $\sigma \geq 355 \text{ MPa}$  (the container was irreversibly deformed) but they remain within the limits of strength  $\sigma \leq 470 \div 630 \text{ MPa}$ . The graph (Fig. 9) shows only the results of three tensimeters as the other were damaged at the explosion. The graph also shows a great difference between the indications of sensors placed in opposite places of the container perimeter. It is probably a result of unsymmetrical distribution of the blast wave during explosion.

### 3.2. Strength Tests for Option 2 Container

The container was put on testing set-up. Measurement instruments were installed and explosive charges were put in container and detonated. Consecutive recorded film frames starting from initiation of explosion to its end are presented in figure 11.



**Rys. 11. Obrazy zarejestrowane przez kamerę podczas badań**

*Fig. 11. Pictures recorded by a camera at tests*

Analizując uzyskane obrazy można zauważyć pozytywne oraz negatywne zjawiska wynikające z wprowadzenia zmian, wobec badania pojemnika w pierwszej wersji:

- woda umieszczona na dnie pojemnika spowodowała „zaczopowanie” jego dna, a przez to zmniejszyła się odległość pomiędzy centrum wybuchu a powierzchnią dennicy pojemnika; sytuacja ta spowodowała, że po wybuchu, ciśnienie fali przyczyniło się do znacznych odkształceń sprężystych w elementach podstawy (ugięcie). W tej sytuacji po odprężeniu cała konstrukcja pojemnika „podskoczyła”. Zjawisko to jest widoczne na ostatniej klatce (rys. 11) oraz na wykresach przebiegu odkształceń zarejestrowanych przez tensometry umieszczone na podstawie (rys. 15);
- woda spowodowała obniżenie temperatury wewnątrz pojemnika po wybuchu, dzięki temu nie nastąpił zapłon elementów wygłuszenia i wytłumienia.

W związku z tym, że pojemnik po pierwszych badaniach miał lokalne odkształcenia pobocznic, trudno było ocenić, czy powiększyły się one w wyniku drugiego narażenia. Zauważono jednak zwiększone odkształcenie jego pokrywy.

Na wykresach (rys. 12 - 14) pokazano wartości naprężeń, wynikających z odkształceń elementów konstrukcji zarejestrowanych podczas badań.

Z analizy wykresów wynika, że maksymalne naprężenia zarejestrowane podczas badań wynoszą:

- 405 MPa – na belce podstawy;

Analysing the received pictures some positive and negative effects caused by changes introduced to the first option of container may be noticed:

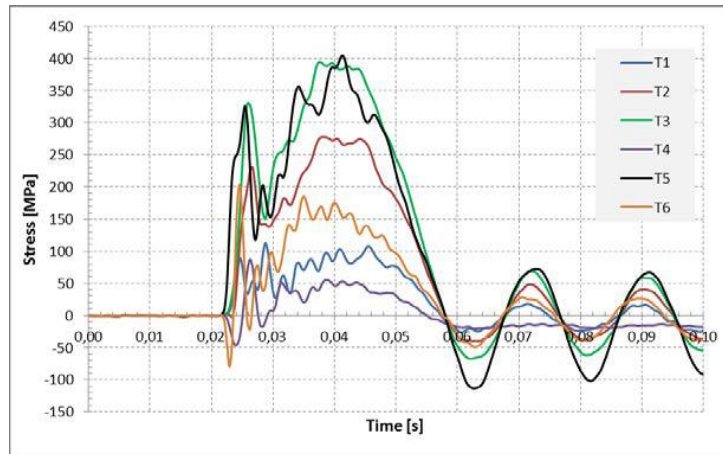
- The water included in the bottom of container caused its base was “blocked” and distance between explosion centre and the container floor was reduced; this situation caused that after the explosion the pressure of wave enforced significant elastic strains among the members of the base (bending). Then after rebounding the whole structure “jumped up”. This effect is visible in the last frame (Fig. 11) and on the plots of strain signals recorded by tensimeters placed in the base (Fig. 15);
- The water reduced temperature inside the container after the explosion and there was no ignition of components used to absorb the sound and blast effects.

As the container after the first tests had suffered some local distortions of the side wall it was difficult to assess if they were extended after the second trial. Only increased deformation of the cover was noticed.

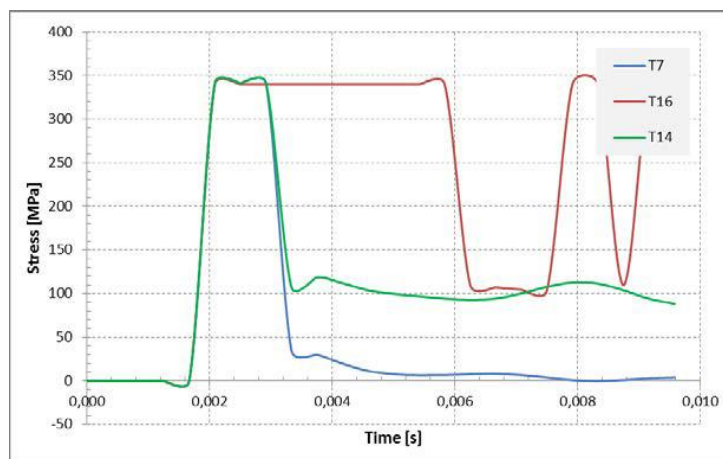
Strain values caused by deformations of structural members and recorded at testing are shown on the graphs (Fig. 12 - 14).

Analysis of graphs shows that there are following maximal strains recorded at tests:

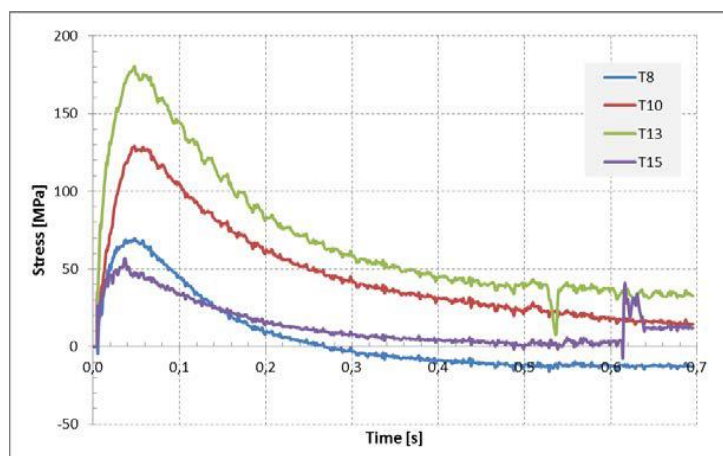
- 405 MPa – on the base beam;



**Rys. 12. Wartości naprężeń w elementach podstawy**  
*Fig. 12. Values of strains for components of base*



**Rys. 13. Wartości naprężeń na poboczniczy zbiornika**  
*Fig. 13. Values of strains on the container side wall*



**Rys. 14. Wartości naprężeń na śrubach pokrywy**  
*Fig. 14. Values of strains for cover bolts*

- 342 MPa – na poboczniczy zbiornika;
- 176 MPa – na śrubie pokrywy.

W odniesieniu do badań naprężeń na poboczniczy pojemnika, na wykresie (rys. 13) pokazano tylko wyniki z trzech tensometrów, ponieważ pozostałe trzy uległy uszkodzeniu podczas wybuchu.

Na wykresie dotyczącym naprężeń w śrubach pokrywy (rys. 14) widoczna jest różnica między wskazaniami czujników rozmieszczonych po przeciwnych stronach pojemnika. Jest to prawdopodobnie spowodowane niesymetrycznym rozkładem fali wybuchowej lub nierównomiernym dokręceniem nakrętek śrub. Nie mniej jednak, wartości te mieszczą się w zakresie granicy plastyczności materiału śrub.

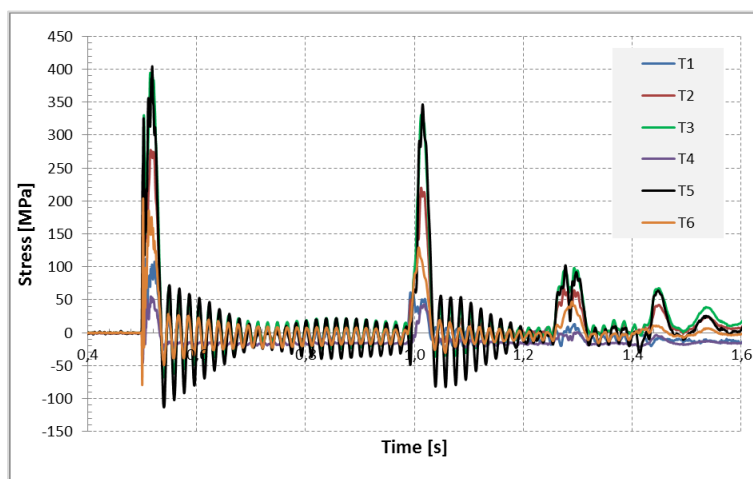
Podczas przeprowadzania badań zaobserwowano, że po wybuchu cała konstrukcja zbiornika „podskoczyła”, co było spowodowane obecnością wody na dnie pojemnika. Odległość od centrum wybuchu do dna pojemnika została zmniejszona z 0,55m do 0,35 m w stosunku do badania wariantu nr 1. Woda jest nieściśliwa, dlatego ciśnienie działające na dno pojemnika a w konsekwencji na ramę podstawy było zwiększone. Zjawisko to jest widoczne na wykresie (rys. 15).

- 342 MPa – on container side wall;
- 176 MPa – on the cover bolt.

Referring to strain tests on the container side wall the graph (Fig. 13) shows only the results of three tensimeters as remaining three were damaged at the explosion.

The graph showing the strains of bolts (Fig. 14) illustrate the difference between the indications of sensors placed on the opposite sides of the container. It may be caused by unsymmetrical distribution of blast wave or unequal fixing of nuts of bolts. Nonetheless these values are in the limits of plasticity for the material of bolts.

During the test it was observed that the whole structure of the container “jumped up” what was caused by the presence of the water on the bottom of the container. The distance from the centre of explosion to the floor of container was reduced from 0.55m to 0.35 m in regard to test for option 1. The water is incompressible so then the pressure acting to the floor of the container and in effect to the frame of the base was greater. This effect is visible on the graph (Fig. 15).



Rys. 15. Rozkład wartości naprężeń w elementach podstawy

Fig. 15. Distribution of strain values for components of base

### 3. Podsumowanie i wnioski

W ramach pracy wykonano model wirtualny i rzeczywisty pojemnika do transportu przedmiotów zawierających materiał wybuchowy. Na wstępie wyznaczono parametry fa-

### 3. Summary and Conclusions

The virtual and real models of a container for transporting the articles with explosive materials were developed in the work. At the beginning were determined

li uderzeniowej powstałej w wyniku detonacji 1 kg TNT w postaci nadciśnienia na czole fali oraz czasu jej trwania. Następnie wykonano obliczenia wytrzymałościowe w sposób analityczny. Obliczenia te miały głównie na celu wstępne oszacowanie wyężenia konstrukcji oraz weryfikację przyjętych założeń.

Z analizy doświadczalnej wyężenia konstrukcji zbiornika widać, że powstałe naprężenia w elementach konstrukcyjnych są na poziomie wartości granicy plastyczności lub nieznacznie ją przekraczają, ale mieszczą się w zakresie granicy wytrzymałości, a zatem można stwierdzić, że pojemnik jest przystosowany do pracy w założonych warunkach narażenia.

the characteristics of blast wave generated at detonation of 1 kg of TNT such as the overpressure of the wave front and its duration. Next the strength analytical calculations were made. These calculations were aimed in general to make initial estimation of stressing for the structure and to verify accepted assumptions.

Analysing experimental stressing of container structure one may see that strains generated in structural members are on the level of plasticity limit or a bit higher but still within the strength limit and so it may be stated that the container is adapted to work in accepted conditions of threat.

### **Literatura / Literature**

- [1] Saska P., Czmochowski J., Iluk A., Przegląd sposobów wyznaczania parametrów fali uderzeniowej wybuchu, *Górnictwo Odkrywkowe*, 4/2010, str. 187 – 192, Wrocław, 2010.
- [2] Remennikov A. M., The state of the Art of Explosive Loads Characterisation, *University of Wollongong*, 2007. Dostępny w internecie: <http://www.aees.org.au>
- [3] Kuczaj A., Modelling of Detonation Products Scattering from a Cylindrical Explosive Charge. Warszawa, 1999.
- [4] Lee J. H. S., Physics of Explosions, *McGill University*, Montreal, Canada, 1984.
- [5] [www.salzgitter-mannesmann.pl](http://www.salzgitter-mannesmann.pl)

*Projekt otrzymał finansowanie z Siódmego Programu Ramowego Komisji Europejskiej  
w zakresie badań i rozwoju technologicznego na podstawie umowy  
o dofinansowanie nr 284747*

*Project was co-financed by the VII Frame Program of the European Commission for the research  
and development works under the agreement No 284747 for finance assistance*