



## Numeryczno-doświadczalna analiza oddziaływania ładunku wybuchowego na przeciwminowy trał naciskowy

Piotr KRYSIAK<sup>\*1</sup>, Wiesław JASIŃSKI<sup>1</sup>, Marcin SZCZEPANIAK<sup>1</sup>,  
Andrzej WOJCIECHOWSKI<sup>1</sup>, Wiesław BARNAT<sup>2</sup>, Paweł DYBCIO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej, ul. Obornicka 136, 50-961 Wrocław,

<sup>2</sup>Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna,  
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa,

\* e-mail: krysiak@witi.wroc.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 28.06.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 28.02.2015

DOI: 10.5604/20815891.1185958

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono projekt mechanicznego kołowego urządzenia trałującego. Po wybraniu odpowiedniej koncepcji wykonano model geometryczny urządzenia. Następnie model dyskretny trału poddano analizie wytrzymałościowej. W kolejnej fazie wykonano prototyp jednego segmentu konstrukcji oraz przeprowadzono na nim badania wytrzymałościowe na poligonie doświadczalnym. Kołowy pojazd wyposażony w omawiane urządzenie będzie służył do trałowania naciskowego dróg, w których mogą być ukryte ładunki wybuchowe, szczególnie ładunki typu IED (*Improvised Explosive Device*). Trał docelowo będzie współpracował z pojazdem o podwyższonej ochronie załogi.

**Słowa kluczowe:** mechanika, modelowanie, ładunek wybuchowy, trał przeciwminowy

## 1. WSTĘP

Zapewnienie ruchu i wysokiej manewrowości wojsk na współczesnym polu walki możliwe jest dzięki użyciu sprzętu inżynieryjnego o wysokich parametrach technicznych w różnych warunkach taktycznych. Wymagania te dyktują potrzebę montowania sprzętu inżynieryjnego na lekkich pojazdach opancerzonych, szczególnie tych, które zapewniają podwyższoną ochronę załogi.

W warunkach bojowych często wymagane jest wykonanie przejścia w polu minowym dla czołgów i transporterów opancerzonych (pierwszego rzutu) w możliwie jak najkrótszym czasie. Do tego celu najczęściej stosuje się trałowanie ciężkie za pomocą trałów wykopowych zamontowanych na podwoziach czołgowych. Istotnym zastosowaniem trałowania jest także oczyszczanie dróg przejazdu konwojów patrolujących tereny objęte konfliktem zbrojnym. Trały wykorzystuje się również do oczyszczenia terenu z min np. w celu przygotowania terenu dla rozlokowania się wojska po zakończeniu przegrupowania.

Urządzenia trałujące są wykorzystywane zarówno w obszarze bojowym, jak i humanitarnym. Szczególnie w ostatnich latach zrodziła się potrzeba rozminowania terenów, na których zakończono działania wojenne, ze względu na śmiertelne wypadki wśród ludności cywilnej zamieszkującej te tereny [2].

Współcześnie czynności związane z rozminowaniem wykonuje się w sposób zmechanizowany następującymi metodami: mechaniczną, wybuchową, niekontaktową i kombinowaną. Do każdej z ww. metod stosowane są specjalistyczne urządzenia saperskie do rozminowania. W metodzie wybuchowej są to różnego rodzaju ładunki rozminowania, a w pozostałych metodach – trały przeciwminowe. Trały te ze względu na rodzaj osprzętu trałującego dzielimy na: wykopowe, naciskowe i udarowe (bijakowe). Trały wykopowe montowane są przeważnie na ciężkich pojazdach gaśnicowych, natomiast dwa pozostałe można montować na pojazdach ciężkich gaśnicowych lub lekkich kołowych. Szczegółową analizę aktualnych rozwiązań konstrukcyjnych trałów wykonano w pracach [1, 3].

Mając na uwadze aktualne potrzeby militarne, w Wojskowym Instytucie Techniki Inżynieryjnej we współpracy z Wojskową Akademią Techniczną zaprojektowano i wykonano konstrukcję trału naciskowego, który docelowo będzie montowany na opancerzonym pojeździe wojskowym o podwyższonej ochronie załogi.

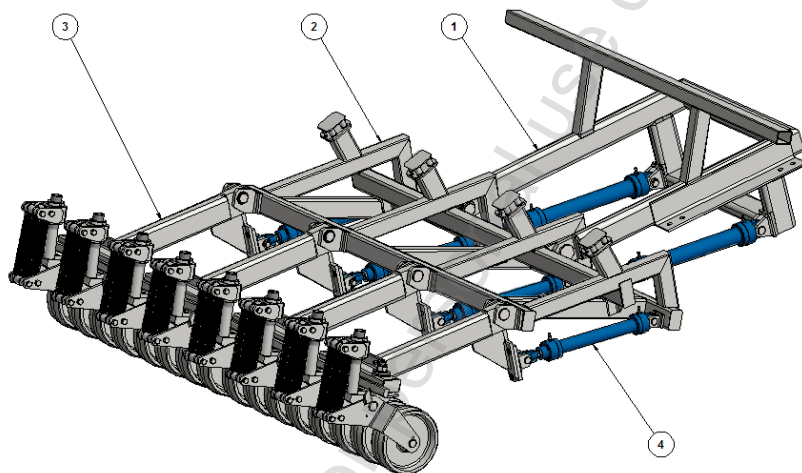
## 2. MODEL GEOMETRYCZNY URZĄDZENIA

Model geometryczny urządzenia (rys. 1) wykonano przy wykorzystaniu komputerowych narzędzi wspomagających prace inżynierskie. Geometrię trału, jak również wstępne obliczenia, wykonano w systemie Autodesk Inventor.

Zamodelowana konstrukcja urządzenia składa się z następujących zespołów oraz elementów:

- ramy stałej (1);
- ramy nośnej (2);
- wahaczowego zespołu kołowego (3);
- siłowników hydraulicznych (4).

Główne elementy wchodzące w skład konstrukcji nośnej wykonano z ogólnie dostępnych rur o przekroju prostokątnym. Koła układu roboczego o odpowiednich średnicach oraz parametrach użytkowych dobrano z katalogu firmy Blickle. Dodatkowo zastosowano amortyzowanie kół, poprzez połączenie wahacza z belką za pomocą pakietów naciągowych sprężyn śrubowych. Przemieszczenia poszczególnych elementów trału są realizowane poprzez siłowniki oraz układ hydrauliczny.



Rys. 1. Model geometryczny urządzenia

Fig. 1. Geometric model of the device

Większość elementów konstrukcji wykonano z powszechnie dostępnej stali konstrukcyjnej S355. Podyktowane to jest przede wszystkim obniżeniem kosztów wykonania elementów szczególnie narażonych na zniszczenie. W celu zapewnienia dostatecznej sztywności, konstrukcję wykonano technologią spawania. Zespoły układu roboczego, które mają bezpośredni kontakt z materiałem wybuchowym, połączono elementami rozłącznymi w postaci śrub oraz sworzni zabezpieczonych nakrętkami lub pierścieniami osadczymi. Rozwiązanie takie jest korzystne, ponieważ w przypadku uszkodzenia elementów roboczych konieczne jest umożliwienie szybkiej ich wymiany w warunkach polowych.

### 3. OBLICZENIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

W kolejnym etapie wykonano model dyskretny oraz wstępne/przybliżone obliczenia wytrzymałościowe urządzenia. W ten sposób możliwe były: oszacowanie poprawności wcześniej przyjętych przekrojów materiałów, ich weryfikacja oraz wizualizacja pola zniszczenia wywołanego działaniem wygenerowanego obciążenia.

W celu obliczenia wartości nadciśnienia na czole fali uderzeniowej  $p^+$  wykorzystano następującą zależność [5]:

$$p^+ = \varphi(k) \frac{E}{R^3} \quad (1)$$

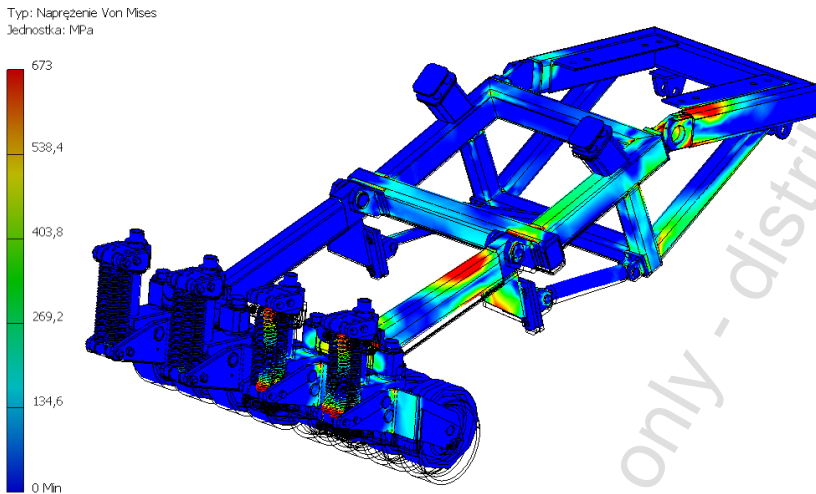
gdzie:

- $p^+$  – maksymalne nadciśnienie na czole fali uderzeniowej [MPa];
- $\varphi(k)$  – współczynnik zależny od izentropy gazu w obszarze objętym działaniem fali uderzeniowej  $k$ . Dla silnego wybuchu w powietrzu ( $k = 1,2$ ),  $\varphi(k) = 0,1038$ ;
- $E$  – średnia energia wybuchu przypadająca na jednostkę masy MW; dla TNT:  $E = 4,2 \cdot 10^6$  [J/kg];
- $R$  – odległość od centrum wybuchu [m].

Trał pracuje w warunkach narażenia na bezpośrednie oddziaływanie ładunków wybuchowych, często niewiadomego pochodzenia. Dlatego obciążenie do obliczeń przyjęto w formie impulsowego działania fali uderzeniowej o wartości pochodzącej od detonacji 8 kg trinitrotoluenu (TNT) umieszczonego na głębokości 0,3 m pod zestawem kołowym. Dla takich parametrów, przy dodatkowym uwzględnieniu współczynnika wykorzystania ładunku wybuchowego [4], maksymalne obliczone nadciśnienie  $p^+$  wynosi 21,5 MPa.

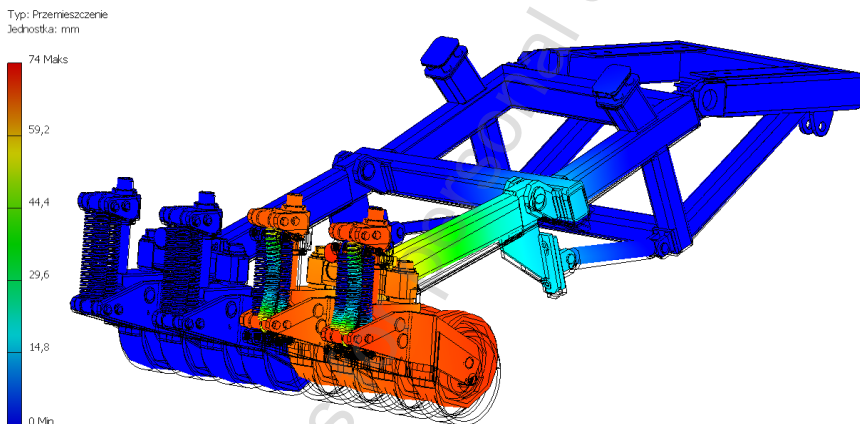
W kolejnym kroku wykonano obliczenia wytrzymałościowe dla dwóch segmentów trału, przy czym narażeniu został poddany tylko jeden segment. Wyniki analizy przedstawiono w postaci warstwic naprężeń zredukowanych (rys. 2) oraz warstwic przemieszczeń (rys. 3).

Według przeprowadzonych obliczeń, wyężenie materiału elementów konstrukcyjnych w niektórych miejscach nieznacznie przekracza granicę wytrzymałości, która dla zastosowanej stali konstrukcyjnej S355 wynosi 630 MPa. Wobec tego należy spodziewać się uszkodzenia niektórych elementów trału. Z drugiej zaś strony konieczne jest przeprowadzenie badań doświadczalnych (poligonowych) w celu weryfikacji postawionych założeń oraz dobranych przekrojów elementów konstrukcyjnych.



Rys. 2. Rozkład warstwicy naprężeń zredukowanych

Fig. 2. Stress contour plot



Rys. 3. Rozkład warstwicy przemieszczeń

Fig. 3. Displacement contour plot

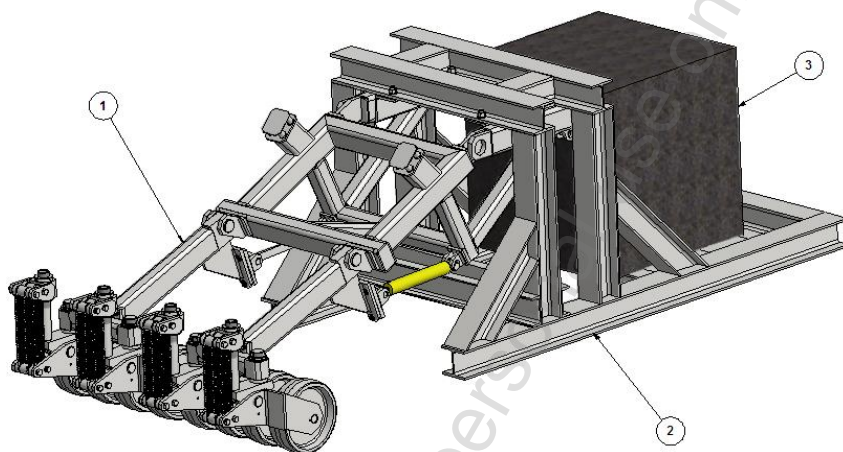
#### 4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Przedmiotem badań było sprawdzenie zachowania się konstrukcji trału podczas wybuchu 8 kg TNT. W ramach sprawdzenia wykonano dwa badania. Celem pierwszych z nich był przede wszystkim eksperymentalny pomiar odkształceń wybranych elementów konstrukcji trału w aspekcie obciążeń eksploatacyjnych. W drugim badaniu sprawdzano, czy segment trału po narażeniu zachowuje się w sposób zaprojektowany.

Belki, na których są zamontowane zestawy kołowe, połączone zostały z ramą trału w dwóch punktach – przegubowo za pomocą sworznia z belką poprzeczną oraz za pomocą połączenia śrubowego z płytą u spodu ramy. Połączenie śrubowe zostało tak zaprojektowane, aby po obciążeniu segmentu siłą wybuchu, śruby uległy ścięciu, a cały segment doznał obrotu wokół wspomnianego połączenia przegubowego i wytłumił siłę uderzenia na zderzaku umieszczonym na ramie trału w jej górnej części (rys. 4).

W celu przeprowadzenia badań doświadczalnych wybuchu pod trałem, zaprojektowano i zbudowano stanowisko badawcze, przedstawione na rysunku 4.

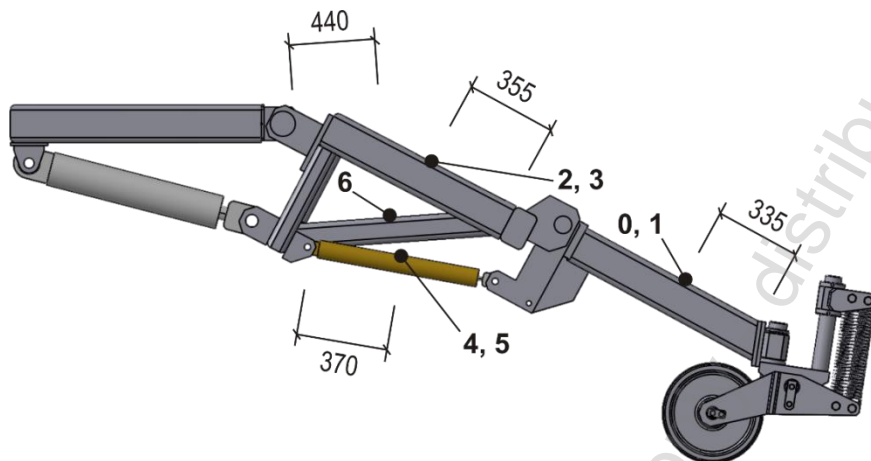
Po zamontowaniu segmentu trału do ramy stanowiska, dociążono cały układ masą równą 2720 kg.



Rys. 4. Stanowisko badawcze: 1 – trał, 2 – rama stanowiska, 3 – obciążenie

Fig. 4. Test stand: 1 – mine roller, 2 – frame, 3 – load

Pomiar odkształceń zrealizowano za pomocą czujników tensometrycznych, które naklejano parami po obu stronach belek segmentu trału, na powierzchniach górnej i dolnej (rys. 5). W celu pomiaru odkształceń w punkcie pomiarowym 4 i 5, siłowniki hydrauliczne zastąpiono belkowymi o odpowiedniej sztywności i przekroju prostokątnym (widoczne na rys. 8). Taki zabieg miał na celu głównie ograniczenie kosztów związanych z możliwym zniszczeniem siłowników hydraulicznych po wybuchu.



Rys. 5. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych

Fig. 5. Distribution of measuring points

W celu wywołania detonacji i odpowiedniego obciążenia układu użyto ładunku wybuchowego o masie 8 kg „TNT lanego” w postaci 20 kostek po 400 g każda. Przygotowany ładunek zainstalowano pod zestawem kołowym trału (rys. 6), a następnie uzbrojono i odpalono za pomocą zapalarki elektrycznej TZK – 100A.

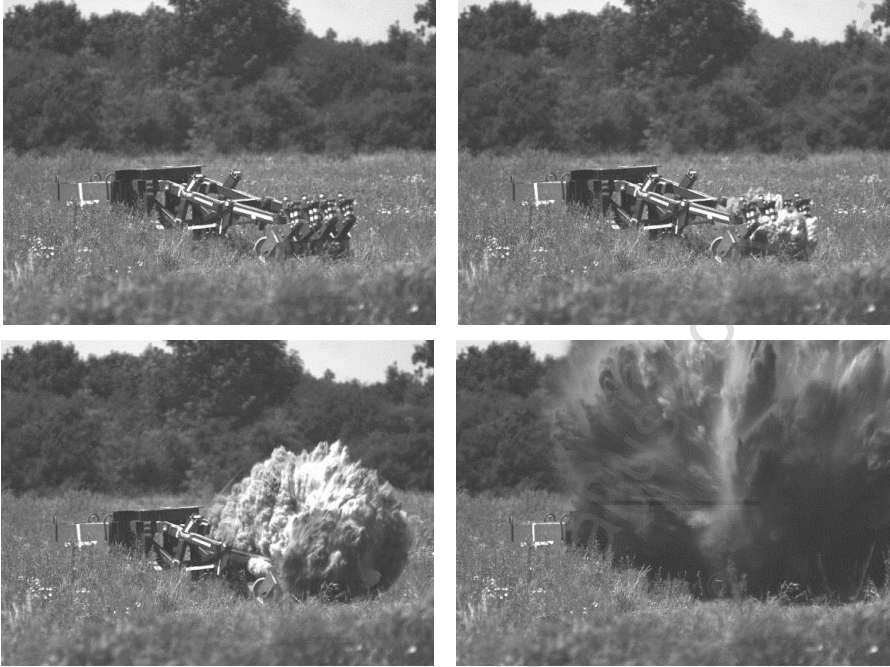


Rys. 6. Ładunek wybuchowy podłożony pod zestaw kołowy trału

Fig. 6. Explosive charge under mine roller

Podczas badań efekty działania fali uderzeniowej rejestrowano za pomocą szybkiej kamery Phantom V12. Dzięki temu możliwa była weryfikacja zachowania się konstrukcji trału podczas eksplozji.

Na rysunku 7 przedstawiono kolejne sekwencje wybranych klatek zarejestrowanych obrazów podczas próby poligonowej, a na rysunku 8 pokazano trań bezpośrednio po badaniach.



Rys. 7. Obrazy zarejestrowane podczas badań doświadczalnych

Fig. 7. Images recorded during the experimental tests



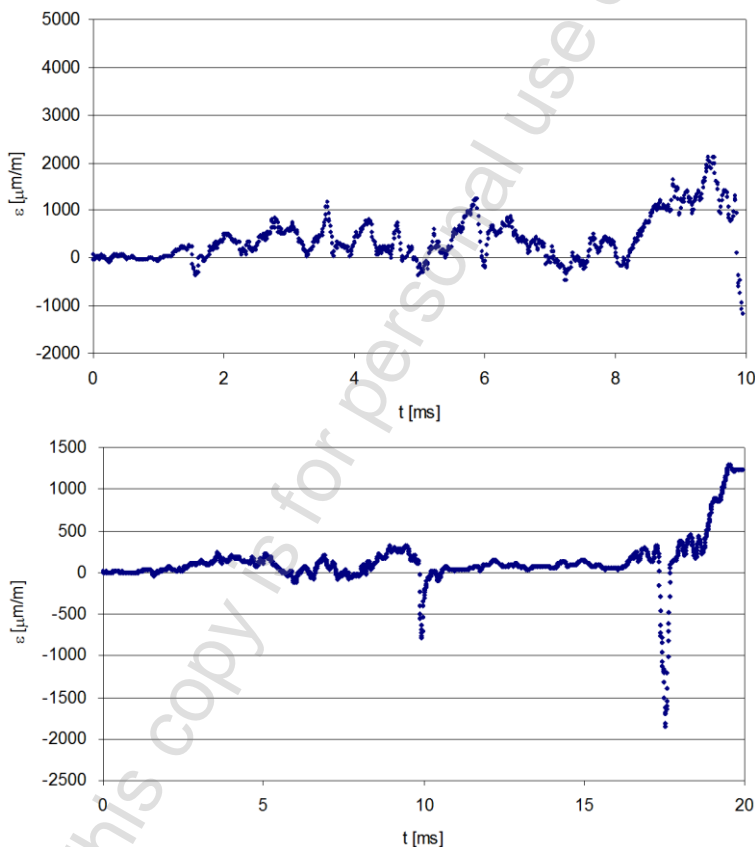
Rys. 8. Widok trań po badaniach: po pierwszym wybuchu (z lewej) i po drugim wybuchu (z prawej)

Fig. 8. View mine roller after the experimental tests: after the first explosion (on the left) and after the second explosion (on the right)



Po wykonaniu pierwszych badań poligonowych stwierdzono (rys. 8 – fotografia z lewej strony), że zniszczeniu uległ jedynie zestaw kołowy na wahaczu, pod który został podłożony ładunek wybuchowy (uszkodzeniu uległa spoina). Pozostałe elementy konstrukcji pozostały w stanie pozwalającym na ich dalsze użytkowanie. Ten fakt sugeruje, że po wymianie uszkodzonego elementu, urządzenie może kontynuować wykonywanie nałożonych na niego zadań.

W czasie wykonywania drugiego badania ładunek wybuchowy podłożono pod drugi – nieuszkodzony zestaw kołowy oraz zastosowano mniejszy przekrój śrub łączących belkę zestawu kołowego z ramą. W efekcie wybuchu zniszczeniu uległ (rys. 8 – fotografia z prawej strony) zestaw kołowy. Natomiast śruby zostały zerwane (zgodnie z założeniem), a belka zestawu kołowego obróciła się względem punktu mocowania i oparła się o zderzaki. W ten sposób wspomniana belka oraz rama nie uległy poważnemu uszkodzeniu.



Rys. 9. Zmiana (w czasie  $t$ ) wartości odkształceń  $\varepsilon$  belki w punkcie pomiarowym nr 3 (na górze) oraz siłownika w punkcie pomiarowym 5 (na dole)

Fig. 9. Graph  $\varepsilon$ - $t$  for measuring point 3 (top) and point 5 (bottom)

Na wykresach (rys. 9) pokazano przebieg odkształceń  $\varepsilon$ , zarejestrowanych podczas badań dla punktu pomiarowego nr 3, umieszczonego na belce ramy oraz dla punktu pomiarowego nr 5 umieszczonego na belce zastępującej siłownik hydrauliczny (wg rys. 6).

Z analizy wykresu wynika, że maksymalne naprężenia zarejestrowane podczas badań dla elementu ramy wynoszą ok. 420 MPa, a dla siłownika ok. 380 MPa. Zmierzone wartości mieszczą się w zakresie granicy wytrzymałości stali S355, co dowodzi, że założenia projektowe były zadane odpowiednio do pracy konstrukcji.

## 5. PODSUMOWANIE

Wykorzystanie programów komputerowego wspomaganie projektowania pozwoliło na zbudowanie modelu urządzenia oraz wykonanie na nim symulacji bez konieczności budowania modeli rzeczywistych, a tylko jednego jego segmentu.

Urządzenie zostało poddane badaniom w warunkach poligonowych na bezpośrednie oddziaływania materiału wybuchowego. Wynik eksperymentalny potwierdza założenia projektowe oraz wcześniej wykonane obliczenia, zgodnie z nałożonymi warunkami brzegowymi.

W celu weryfikacji obliczeń wytrzymałościowych, podczas badań rejestrowano odkształcenia elementów konstrukcyjnych trału za pomocą czujników tensometrycznych. Wyniki pomiarów potwierdziły założenia projektowe.

## LITERATURA

- [1] Holota M., Kaźmierczak U., *Sprzęt inżynierski do rozminowania terenu. Szybkobieżne pojazdy gąsienicowe*, Wydawnictwo OBRUM, nr 1, Gliwice, 2009.
- [2] Jasiński W., Krysiak P., Szczepaniak M., Barnat W., Moneta G., *Urządzenie trałujące do rozminowania dróg na terenach niebezpiecznych – projekt, obliczenia, wykonanie*, *Journal of Transdisciplinary Systems Science*, vol. 16, nr 1, s. 227-233, Wrocław, 2012.
- [3] Kazura A., *Wybrane metody i sprzęt do rozpoznania i unieszkodliwiania min. Szybkobieżne pojazdy gąsienicowe*, Wydawnictwo OBRUM, nr 1, Gliwice, 2007.
- [4] Krzewiński R., *Dynamika wybuchu: metody określania obciążeń*, Wydawnictwo WAT, Warszawa, 1982.
- [5] Kuczaj A., *Modelling of detonation products scattering from a cylindrical explosive charge*, Warszawa, 1999.

## **Numerical and Experimental Analysis of Impact of Explosive Charge on a Mine Roller**

Piotr KRYSIAK, Wiesław JASIŃSKI, Marcin SZCZEPANIAK,  
Andrzej WOJCIECHOWSKI, Wiesław BARNAT, Paweł DYBCIO

**Abstract.** The paper presents the whole process of designing a mechanical mine roller starting from the concept in the initial phase to the geometric model of the device. Later stage involved the pre-defined geometry undergoing resistance analysis. The later stage included manufacture of one segment of the mine roller and its tests under field conditions. The vehicle onto which the roller will be mounted is intended as a tool to keep the roads traversable and clear of IEDs (Improvised Explosive Devices) in particular. The mine roller will be mounted onto a mine-clearing vehicle with increased armoured protection.

**Keywords:** mechanics, modelling, mine roller, explosive charge

- This copy is for personal use only - distribution prohibited.

- This copy is for personal use only - distribution prohibited.

- This copy is for personal use only - distribution prohibited.

- This copy is for personal use only - distribution prohibited.

*This copy is for personal use only - distribution prohibited*