



## WYBRANE ZAGADNIENIA Z PROJEKTOWANIA I BADAŃ MODELI 98 MM MOŹDZIERZOWYCH POCISKÓW DYMNYCH

Bogdan PIĄTEK, Bohdan ZARZYCKI  
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono proces projektowania wybranych detali pocisku dymnego do 98 mm moździerzka na podstawie analizy wyężenia komponentów z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych (MES) przy użyciu programu INVENTOR firmy Autodesk®. Przeprowadzono analityczne i numeryczne obliczenia wytrzymałościowe wybranych elementów pocisku, a następnie wykonano i przebadano modele.

Słowa kluczowe: pocisk dymny, projektowanie, badania

## SELECTED PROBLEMS OF DESIGNING AND TESTING ON MODELS OF 98 MM MORTAR SMOKE SHELLS

Bogdan PIĄTEK, Bohdan ZARZYCKI  
Military Institute of Armament Technology

**Abstract:** In this paper it was presented construction designing process of selected parts of 98 mm mortar smoke shell on the basis of structural components effort analysis by using the finite elements method (FEM) issued by AUTODESK INVENTOR® SIMULATION computer software. There were conducted analytical and numerical stress calculations for selected components of the shell, and then the models were performed and finally tested.

Keywords: mortar smoke shell, construction designing, testing

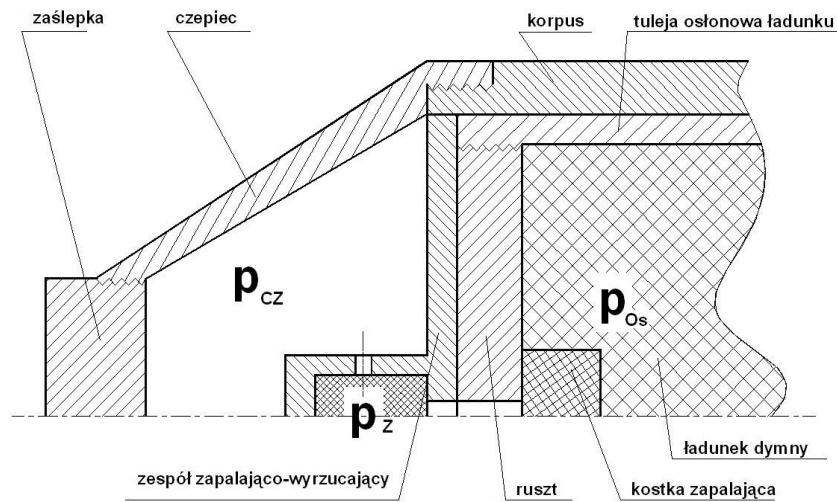
### 1. Wstęp

Obliczenia i analizę konstrukcji elementów pocisku dymnego przeprowadzono w oparciu o schemat przedstawiony na rys. 1.

Zgodnie z powyższym rysunkiem obliczono następujące elementy pocisku:

- zespół zapalająco-wyrzucający,
- czepiec balistyczny.

Następnie przeprowadzono analizę wyężenia komponentów z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych (MES) przy użyciu programu INVENTOR firmy Autodesk® obrazującą wizualnie, rozkład naprężeń i przemieszczeń dla statycznego obciążenia elementu (detalu) modelu pocisku.



Rys. 1. Schemat do obliczeń pocisku (opracowanie własne)

## 2. Obliczenia

### 2.1. Ciśnienie w zespole zapalająco-wyrzucającym

Określono ciśnienie panujące wewnątrz zespołu zapalająco-wyrzucającego, ze wzoru Nobla-Abla [2]:

$$p_z = \frac{f \cdot \Delta}{1 - \alpha \cdot \Delta} \quad (1)$$

gdzie:  $\Delta = \frac{\omega}{W_{OZ}}$  - gęstość ładowania

Dane wejściowe:

- $f = 0,3$  MJ/kg – siła prochu czarnego,
- $\omega = 0,02$  kg – masa prochu czarnego,
- $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/kg – kowolumen dla prochu czarnego,
- $W_{OZ} = 5,2 \cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup> – objętość swobodna.

Wynik obliczenia:  $p_z = 140$  MPa

Wytrzymałość na rozerwanie elementu zespołu zapalająco-wyrzucającego wykonanego zgodnie z [3] określono ze wzoru wg [4] (dla rury opatrzonej dnami):

$$p_{roz} = \frac{k_{rC30} \cdot (b_z^2 - a_z^2)}{\sqrt{3} \cdot b^2} \quad (2)$$

Dane wejściowe:

- $k_{rC30} = 500$  MPa - dopuszczalne naprężenie rury bezszwowej (materiał C30 – PN-EN 10083-2A1:1999),
- $b_z = 2,2 \cdot 10^{-2}$  m - promień zewnętrzny,
- $a_z = 1,825 \cdot 10^{-2}$  m - promień wewnętrzny,

Wynik obliczenia:  $p_{roz} = 90$  MPa.

Zespół zapalająco-wyrzucający powinien ulec rozerwaniu ( $140$  MPa =  $p_z > p_{roz} = 90$  MPa).

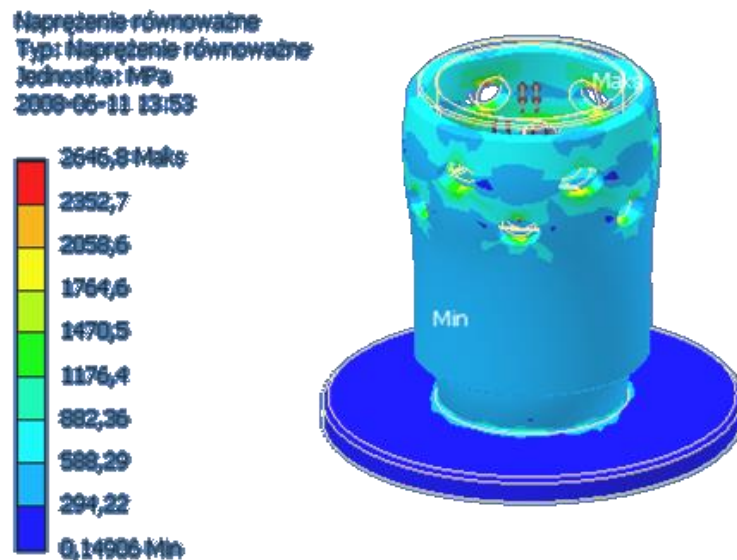
W zespole znajdują się jednak otwory (wykonane prostopadle do jego osi), przez które nastąpi wypływ gazów prochowych. W konsekwencji spowoduje to, że wystąpi spadek ciśnienia, a ciśnienie wewnątrz zespołu zapalająco-wyrzucającego może osiągnąć, w czasie rzędu milisekund, wartość  $p_{roz} = 90$  MPa.

## 2.2. Analiza wytrzymałościowa MES zespołu zapalająco-wyrzucającego

Dokonano przeliczenia zespołu zapalająco-wyrzucającego przy następujących założeniach wstępnych:

- wewnątrz zespołu zapalająco-wyrzucającego panuje ciśnienie statyczne  $p_Z = 90$  MPa,
- nie uwzględnia się wypływu gazów prochowych przez otwory,
- zadanie wytrzymałościowe rozpatrywane jest przy założeniu liniowych charakterystyk materiałowych i izotropowości materiału,
- przyjęto liniowo-sprężystą charakterystykę własności wytrzymałościowych materiału.

Określono wyężenie zespołu, którego wizualizację przedstawiono na rys. 2 (strzałki wewnątrz symbolizują sposób przyjętego działania ciśnienia od gazów prochowych).



Rys. 2. Wyężenie zespołu zapalająco-wyrzucającego wg hipotezy H-M-H (opracowanie własne)

Wyężenie przyjętego materiału zespołu zapalająco-wyrzucającego wg hipotezy H-M-H uzyskało największą wartość na jego zewnętrznej powierzchni. Naprężenia osiągnęły wartość 882 MPa i przekroczyły naprężenia dopuszczalne dla materiału, z którego wykonany jest zespół ( $k_{rC30} = 500$  MPa) – uzyskano odkształcenia porównywalne do otrzymanych wyników podczas próby poligonowej (rozcalenia statycznego) pocisku (fot.1).

## 2.3. Ciężnienie w czepcu balistycznym

Zgodnie ze wzorem (1) określono ciśnienie panujące we wnętrzu czepca balistycznego (wykonanego wg [3]).

Dane wejściowe:

- proch czarny o parametrach podanych w p. 2.1.,
- $\omega = 0,02$  kg - masa prochu czarnego,
- $W_{oCZ} = 18,9 \cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup> - objętość swobodna.

Wynik obliczenia:  $p_{CZ} = 32,9$  MPa.

Wytrzymałość czepca balistycznego na rozerwanie obliczono ze wzoru (2), dla danych wejściowych:

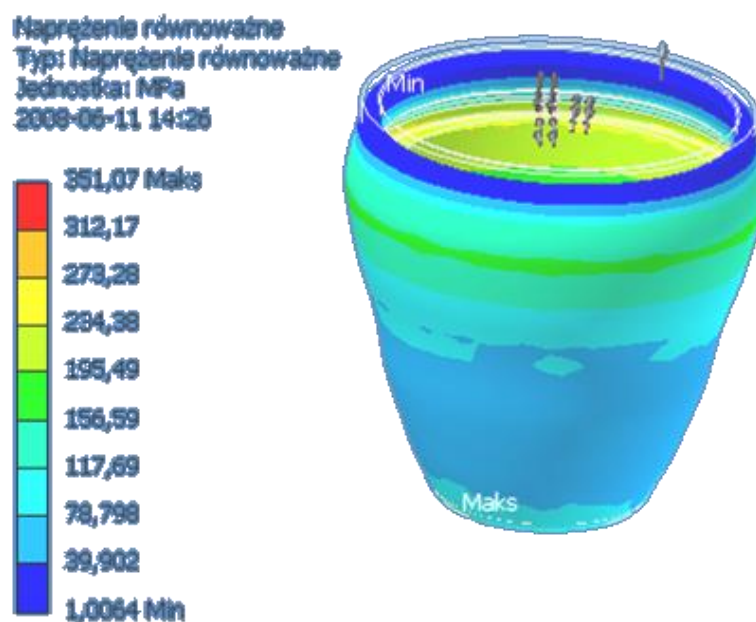
- $k_{rSt5} = 500$  MPa - dopuszczalne naprężenie (materiał St5 - PN-80/H -93014),
- $b_{CZ} = 4,835 \cdot 10^{-2}$  m - promień zewnętrzny czepca w najwęższym przekroju,

-  $a_{CZ} = 4,525 \cdot 10^{-2}$  m - promień wewnętrzny czepca w największym przekroju,  
Wynik obliczenia:  $p_{rozCZ} = 35,8$  MPa.

Ponieważ występujące naprężenia są mniejsze od naprężeń dopuszczalnych dla materiału, z którego wykonany jest czepiec przyjęto, że został on zaprojektowany poprawnie (współczynnik bezpieczeństwa  $\frac{P_{rozCZ}}{P_{CZ}} = 1,09$ ).

## 2.4. Analiza wytrzymałościowa MES czepca balistycznego

Do analizy wytrzymałościowej czepca balistycznego przyjęto założenia wstępne identyczne jak dla zespołu zapalająco - wyrzucającego. Przyjęto ciśnienie statyczne panujące wewnątrz czepca  $p_{CZ} = 32,9$  MPa.



Rys. 3. Wyświetlenie czepca balistycznego wg hipotezy H-M-H (opracowanie własne)

Naprężenia równoważne na powierzchni wewnętrznej osiągnęły wartość 312 MPa i nie przekroczyły naprężenia dopuszczalnego dla materiału, z którego wykonany jest czepiec ( $k_{rSt5} = 500$  MPa). Czepiec powinien wytrzymać moment rozcalenia pocisku.

## 3. Badania poligonowe (statyczne rozcalenie)

### 3.1. Zespół zapalająco-wyrzucający

Przeprowadzono próbę statyczną rozcalenia pocisku dymnego (wykonanego wg [3]). Odnaleziono zespół zapalająco-wyrzucający, którego wygląd przedstawiono na fot. 1.



**Fot. 1. Zespół zapalająco-wyrzucający po próbie (opracowanie własne)**

Zespół zapalająco-wyrzucający uległ wyraźnemu odkształceniu plastycznemu, ale nie pękł, a w okolicach otworów nastąpiło zwiększenie średnicy o 0,2 mm.

Przeprowadzona próba potwierdziła przyjęte założenia, że zespół zapalająco-wyrzucający poddany został krótkotrwałemu (rzędu milisekund) działaniu ciśnienia gazów prochowych, którego wartość była mniejsza niż 90 MPa, ale zostały przekroczone dopuszczalne naprężenia dla materiału C30, z którego wykonano zespół zapalająco-wyrzucający.

### 3.2. Czepiec balistyczny

Próby statycznego rozcalenia pocisku dymnego potwierdziły przyjęte założenia. Jednak podczas kolejnej próby dla modelu pocisku dymnego (wykonanego wg [3]) nastąpiło oddzielenie czepca balistycznego od korpusu pocisku. Po próbie odnaleziono czepiec balistyczny, którego wygląd przedstawiono na fot. 2.



**Fot. 2. Czepiec balistyczny po rozcaleniu statycznym z zaślepką (opracowanie własne)**

Rozcalenie przebiegło nieprawidłowo, ponieważ czepiec odłączył się od korpusu pocisku. Czepiec uległ wyraźnemu odkształceniu plastycznemu w okolicy połączenia z korpusem pocisku. Nastąpiło zwiększenie średnicy zewnętrznej czepca o około 1 mm.

## 4. Analiza przypadku nieprawidłowego rozcalenia

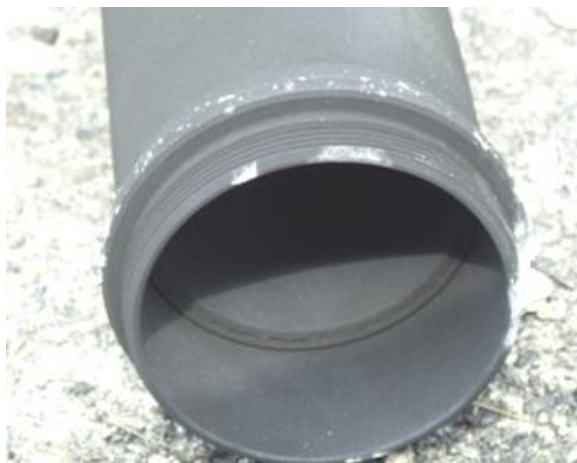
W czasie jednej z prób poligonowych badań modeli nastąpiło niezakładane, nieprawidłowe rozcalenie pocisku. Odnaleziono niektóre elementy pocisku dymnego przedstawiono na fotografiach 2÷5.



**Fot. 3. Korpus z zablokowaną tuleją osłonową ładunku dymnego po rozcaleniu statycznym**  
(opracowanie własne)

Po przeanalizowaniu tego badania poligonowego wysunięto następującą hipotezę: *podczas statycznej próby rozcalenia pocisku dymnego w czepcu balistycznym panowało ciśnienie wyższe niż zakładano - wystąpiło ciśnienie ponad 32,9 MPa.*

Można z dużym prawdopodobieństwem wnioskować, że wzrost ciśnienia spowodowały gazy powstałe w momencie zapalania się kostki zapalającej i inicjacji zapalania się ładunku dymnego. Prawdopodobnie pod wpływem ciśnienia gazów prochowych z zespołu zapalająco-wyrzucającego kostka zapalająca, zamiast zapalić się, zdetonowała. Może o tym świadczyć wygląd tulei osłonowej, a szczególnie oderwany od niej element z gwintem (fot. 5).



**Fot. 4. Korpus z zablokowaną tuleją - widok od strony urwanego gwintu** (opracowanie własne)



**Fot. 5. Oderwany od tulei osłonowej ładunku dymnego element z gwintem oraz ruszt z korkami**  
(opracowanie własne)

#### 4.1. Analityczne obliczenia wytrzymałościowe

Aby potwierdzić postawioną wyżej hipotezę przeprowadzono ponowne (dla większej wartości ciśnień) obliczenia wytrzymałościowe. Obliczenia przeprowadzono zgodnie ze schematem rys. 1 i wzorem (2), w celu określenia wartości ciśnienia będącego w stanie oderwać ruszt od tulei osłonowej ładunku dymnego.

Dane wejściowe:

- $k_{rOS} = 420$  MPa dopuszczalne naprężenie (materiał EN AW 2024 T3 wg PN-EN 573-3-2005),
- $b_{OS} = 4,065 \cdot 10^{-2}$  m – promień zewnętrzny tulei osłonowej,
- $a_{OS} = 3,95 \cdot 10^{-2}$  m – promień wewnętrzny tulei osłonowej.

Wynik obliczenia:  $p_{OS} = 13,5$  MPa.

Po przekroczeniu tej wartości ciśnienia tuleja osłonowa powinna pęknąć. Ponieważ tuleja znajduje się w korpusie pocisku, więc z dużym prawdopodobieństwem należy wnioskować, że jej pęknięcie na skutek zwiększenia wymiarów zewnętrznych jest niemożliwe, a może jedynie zakleszczyć się w korpusie pocisku, co potwierdza wynik przeprowadzonej próby (fot. 3 i 4).

Sprawdzono, czy jest możliwe oderwanie rusztu w oparciu o warunek wytrzymałościowy hipotezy energii odkształcenia postaciowego Hubera [4]:

$$\delta_{red} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2} - \delta_1 \cdot \delta_2 \leq k_r \quad (3)$$

gdzie:

$$\delta_1 = \frac{p \cdot D}{2 \cdot g}, \quad \delta_2 = \frac{p \cdot D}{4 \cdot g} \quad (4)$$

$p$  – ciśnienie wewnątrz tulei osłonowej [MPa],

$D$  – średnica zewnętrzna tulei osłonowej [m],

$g$  – grubość tulei osłonowej [m],

$k_r$  – naprężenia dopuszczalne materiału, z którego wykonana jest tuleja osłonowa [MPa].

Dane wejściowe:

$p_{OS} = 13,5$  MPa,  $D_{OS} = 8,7 \cdot 10^{-2}$  m,

$g_{OS} = 1,15 \cdot 10^{-3}$  m,

$k_{rOS} = 420$  MPa (materiał EN AW 2024 T3).

Wynik obliczenia:  $\delta_{redOS} = 442$  MPa.

Z dużym prawdopodobieństwem należy wnioskować, że przy panującym ciśnieniu  $p_{OS} = 13,5$  MPa, gwint powinien zostać zerwany ( $\delta_{redOS} = 442$  MPa >  $k_{rOS} = 420$  MPa), ponieważ zostały przekroczone naprężenia dopuszczalne.

W czasie zapalania ładunku dymnego wewnątrz tulei osłonowej ładunku wystąpiło o wiele większe ciśnienie niż przyjęto w obliczeniach wstępnych dla konstrukcji modeli pocisku dymnego. Należy zauważyć, że aby takie ciśnienie powstało po stronie ładunku dymnego najpierw powstaje ciśnienie w zespole zapalająco-wyrzucającym o wartości  $p_Z = 140$  MPa, po czym rozpręża się ono przez otwory do wartości  $p_{CZ} = 32,9$  MPa i taka wartość ciśnienia, która jest wewnątrz czepca działa dopiero na zespół zapalająco-wyrzucający, powodując wyrzucenie kostki dymnej (ładunek dymny z tuleją osłonową i rusztem).

Ponieważ  $p_{OS} = 13,5$  MPa jest minimalnym ciśnieniem, jakie będzie w stanie oderwać ruszt od tulei osłonowej, to ciśnienie działające na ruszt od strony ładunku dymnego powinno wynosić:

$$p_{ruszt} = p_{OS} + p_{CZ} \quad (5)$$

Obliczono:

$$p_{ruszt} = 13,5 + 32,9 = 46,4 \text{ MPa}$$

Oszacowano zgodnie z wzorem (1) ciśnienie, jakie mogło panować w czepcu balistycznym pocisku na podstawie skutku statycznego rozcalenia dla pocisku wykonanego wg [3].

Dane wejściowe:

- założono hipotetyczny łączny ładunek wykonany z prochu czarnego (proch czarny w zespole zapalająco-wyrzucającym i proch kostki zapalającej),
- proch czarny o parametrach podanych w p. 2.1.,
- $\omega_l = 0,0414 \text{ kg}$  - łączna masa dla hipotetycznego ładunku,
- $W_{oCZl} = 2,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  - przyjęta łączna objętość swobodna dla hipotetycznego ładunku.

Wynik obliczenia:  $p_{CZl} = 57,4 \text{ MPa}$ .

Założono, że wzrost ciśnienia w czepcu do wartości ponad 60 MPa spowoduje odpadnięcie czepca balistycznego od korpusu pocisku. Tak wysokiego ciśnienia nie jesteśmy w stanie uzyskać z 20 g prochu czarnego (obliczenia w p. 2.3. dla pocisku wykonanego wg [3]).

Zgodnie z przyjętą wcześniej hipotezą ciśnienie to powstało w czasie detonacji kostki zapalającej, a obliczenia potwierdzające przedstawiono poniżej - zgodnie z wzorem (1), dla danych wejściowych:

- $f_K = 0,9 \text{ MJ/kg}$  - siła prochu kostki zapalającej,
- $\omega_K = 0,0214 \text{ kg}$  - masa kostki zapalającej,
- $\alpha_K = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$  - kowolumen prochu kostki zapalającej,
- $W_{oK} = 2,04 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  - objętość swobodna kostki zapalającej.

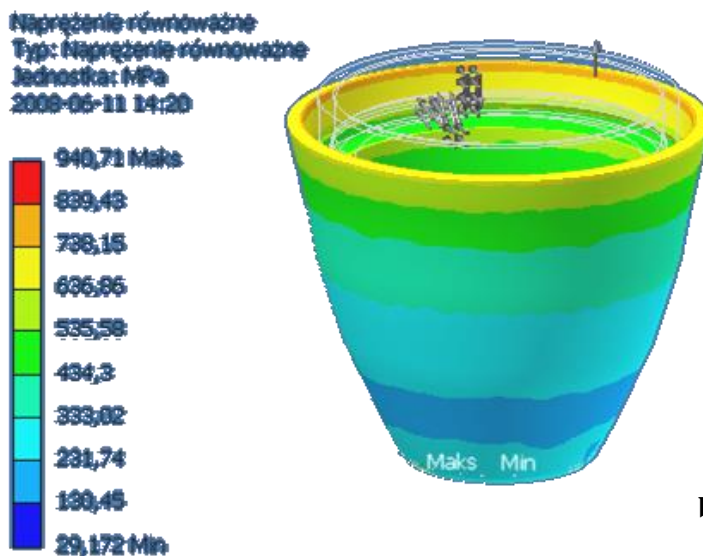
Wynik obliczenia:

$$p_K = 102,3 \text{ MPa}$$

Jeżeli w momencie rozcalania pocisku kostka zapalająca popęka (pod wpływem ciśnienia  $p_Z = 140 \text{ MPa}$ ) i spali się w objętości swobodnej, to z dużym prawdopodobieństwem można wnioskować, że uzyska się ciśnienie ponad 60 MPa wewnątrz czepca balistycznego.

#### 4.2. Analiza wytrzymałościowa MES

Założenia wstępne do analizy wytrzymałościowej czepca balistycznego są identyczne jak w punkcie 2.4, z wyjątkiem ciśnienia panującego wewnątrz czepca. Przyjęto ciśnienie statyczne 60 MPa oraz w modelowaniu obciążenia zastosowano uproszczenie polegające na tym, że w ostrołuku panuje ciśnienie tylko o tej wartości. Wynik analizy wytrzymałościowej przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Wytyczenie czepca balistycznego wg hipotezy H-M-H (opracowanie własne)



Na rys. 4 widać, że zarys zewnętrzny czepca jest zbliżony do pokazanego na fot. 2, co potwierdza przyjętą hipotezę, iż podczas statycznej próby rozcalenia pocisku dymnego w czepcu balistycznym panowało ciśnienie wyższe niż zakładano - ciśnienie ponad 32,9 MPa.

## 5. Podsumowanie

Na etapie projektowania modelu pocisku, analiza wyężenia komponentów z użyciem programu INVENTOR jest bardzo użyteczna do zobrazowania rozkładu naprężeń występujących w badanym elemencie składowym. Wymagana jest jednak duża wiedza o sposobie zaprojektowania elementu oraz przyłożenia poszczególnych obciążeń. W przypadku złych założeń do symulacji otrzymane wyniki nie odzwierciedlają rzeczywistości i błędnie są zobrazowane odkształcenia, czy wyężenia. Można próbować zbudować ekwiwalent elementu, dla którego możliwe będzie zobrazowanie wyężenia i na tej podstawie starać się już na etapie konstrukcji modelu pocisku wstępnie przeprowadzić optymalizację danego komponentu.

Pozwala to na wcześniejszą weryfikację prawidłowości przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego, które ostatecznie można zweryfikować dopiero podczas badania poligonowego.

Po badaniach poligonowych modeli dokonano zmian w konstrukcji 98 mm moździerzowego pocisku dymnego. Wprowadzono rozdzielenie w czasie momentu rozcalenia pocisku od inicjacji, zapalenia kostki dymnej. W ruszcie umieszczono wzmacniacz pirotechniczny, który pełni rolę opóźniacza pirotechnicznego i skutecznie oddziela moment rozcalenia pocisku od zapalenia kostki zapalającej i masy pirotechnicznej ładunku dymnego. W zespole zapalająco-wyrzucającym zrezygnowano z układu dwukomorowego (brak poprzecznych otworów) i wprowadzono zamiast prochu czarnego wolniej spalający się proch nitrocelulozowy.

Wszystkie te zmiany zawiera konstrukcja pocisku, przedstawiona w [5]. Dodatkowo, celem unifikacji z pociskiem kasetowym PKKO-98, przeprowadzono weryfikację elementów składowych.

## Literatura

- [1] Zarzycki B.: *Moździerzowe pociski dymne*, WITU, Problemy techniki uzbrojenia, Zeszyt 99 nr 3/2006, s. 17-24.
- [2] Sieriebriakow M.: *Balistyka wewnętrzna*, Wydawnictwo MON 1955
- [3] Dokumentacja konstrukcyjna na model: 98 mm moździerzowy pocisk dymny, Nr rys. B49.0.0.0.0a1 Nr arch. WITU 5771/C/1
- [4] Rżysko J.: *Statyka i wytrzymałość materiałów*, PWN 1971.
- [5] Dokumentacja konstrukcyjna na partię modelową: 98 mm moździerzowy pocisk dymny, Nr rys. B49.0.0.0.0 Nr arch. WITU 5771/C