



Analiza MES obciążeń cieplnych lufy podczas strzału

JACEK ŁAZOWSKI, JERZY MAŁACHOWSKI, ROBERT KAMIŃSKI*

Wojskowa Akademia Techniczna, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej,

*Instytut Elektromechaniki, Zakład Konstrukcji Specjalnych i Balistyki,

00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Obecnie projektowanie uzbrojenia w dużej mierze opiera się na metodach analitycznych, które nie pozwalają na znaczną poprawę parametrów broni w zakresie odporności udarowej. Szczególnie istotna jest analiza dynamiki dla ruchu pocisku w lufie na stożku przejściowym i ustalenie optymalnych parametrów procesu. Na styku lufy i pocisku zachodzą bardzo złożone procesy termomechaniczne. Oddziaływanie to powoduje powstawanie na powierzchni styku ciał ciepła, a w konsekwencji zmiany właściwości termomechanicznych. Jedyłą skuteczną metodą może być w tym przypadku modelowanie numeryczne. W pracy przedstawiono analizę termomechaniczną podczas szybkozmiennych procesów w trakcie współpracy pocisku z lufą. Przedstawiono modele numeryczne obiektów i zaprezentowano rozkłady temperatury w wybranych sekcjach lufy oraz oszacowano stan odkształcenia spowodowany termomechanicznym obciążeniem. Narzędziem zastosowanym do analizy był pakiet obliczeniowy LS-DYNA umożliwiający symulacje w zakresie nieliniowym z jawnym krokiem całkowania.

Słowa kluczowe: lufa, pocisk, modelowanie numeryczne, analiza termomechaniczna

Symbole UKD: 623.451

1. Wprowadzenie

Określenie efektów cieplnych w układzie lufa–pocisk jest problemem złożonym ze względu na dużą liczbę czynników, które powodują ich powstanie. Procesowi współpracy pocisku i lufy towarzyszy nieustalony proces wymiany ciepła pomiędzy gazami prochowymi a wewnętrzną powierzchnią lufy. Na nieustaloną wymianę ciepła wpływa zmienna w czasie i wzdłuż osi lufy temperatura gazów prochowych oraz wartość współczynnika przejmowania ciepła. W czasie nieustalonego procesu współpracy w wyniku obciążenia cieplnego pojawia się stan naprężenia i odkształcenia, który

w pewnych warunkach może zanikać po powrocie do początkowej równomiernej temperatury lub pozostawać w elementach w charakterze trwałej zmiany. W efekcie wpływ pola temperatur na współpracujące obiekty ma złożone skutki i może powodować np. zmniejszenie odporności konstrukcji na ścieranie [9, 13].

Dotychczas powszechnie stosowane analityczne metody określania wielowymiarowego charakteru zjawiska wymiany ciepła w układzie lufa–pocisk, bazujące na założeniach upraszczających, można uzupełnić analizą numeryczną ciał odkształcalnych o stosownie określonych właściwościach mechanicznych i cieplnych. Podejście to umożliwi wyznaczenie w trakcie dynamicznego procesu współpracy lokalnego stanu odkształcenia i naprężenia powstającego w wyniku działania szybkozmiennego obciążenia cieplnego i mechanicznego.

Przewidywanie zachowania się konstrukcji w stanach ekstremalnych za pomocą analizy numerycznej wynika z intensywnego rozwoju numerycznych metod rozwiązywania problemów technicznych oraz znacznego postępu w dziedzinie możliwości obliczeniowych komputerów. W przypadku skomplikowanych zagadnień inżynierskich o złożonych obciążeniach i kształtach metody analizy numerycznej dają coraz bardziej precyzyjne rozwiązania [2, 3, 7, 12, 17].

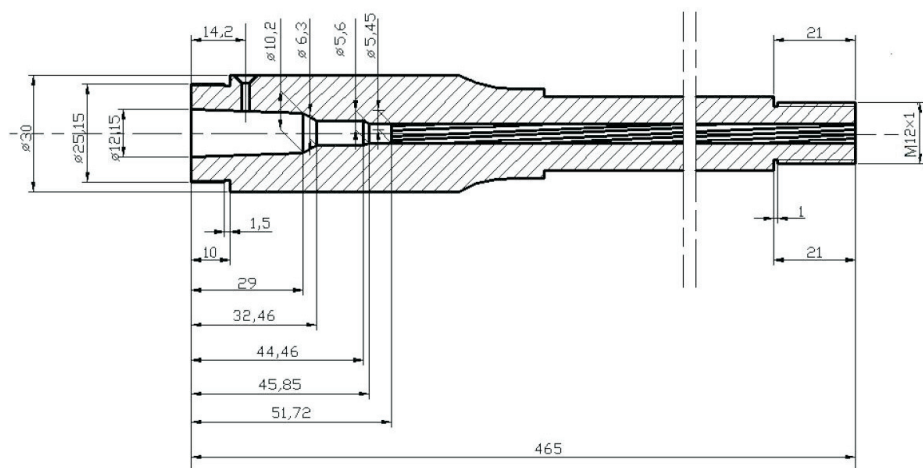
Metody numeryczne opierają się na procedurach obliczeniowych, które pozwalają uzyskać przybliżone rozwiązanie zagadnień fizycznych (np. metoda elementów skończonych) opisanych układem równań różniczkowych. W wyniku rozwiązywania układu równań otrzymujemy pełną informację o zachowaniu się konstrukcji. Obecnie powszechnie używaną metodą analizy numerycznej jest metoda elementów skończonych, na której bazują takie pakiety oprogramowania, jak np. LS-DYNA [6].

W pracy przedstawiono możliwości uwzględnienia w dynamicznym modelu współpracy pocisku i lufy obciążeń cieplnych w zagadnieniach związanych z symulacją procesu strzału.

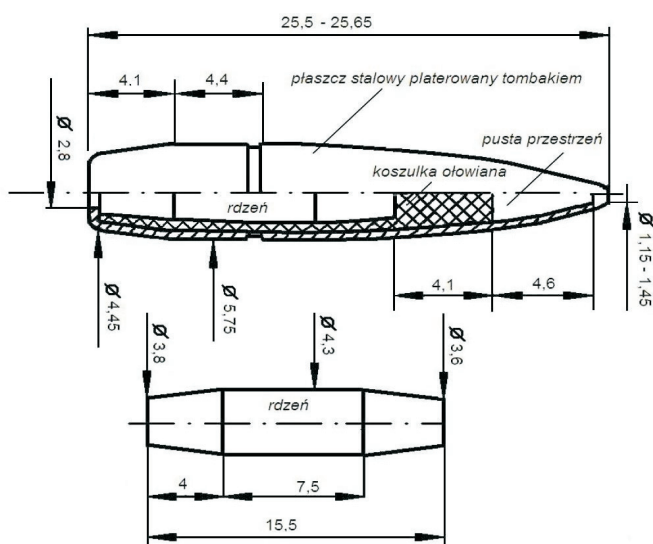
2. Opis układu lufa–pocisk

Analizowanym i badanym układem w pracy była lufa balistyczna kal. 5,45×39 mm. Na rysunku 1 przedstawiono przekrój badanej lufy wraz z naniesionymi wymiarami geometrycznymi.

Lufa składa się z komory naboju oraz części wiodącej. W komorze naboju można wyróżnić stożek główny, oporowy i część walcową. W części wiodącej można wyróżnić stożek przejściowy oraz gwint złożony z pół i bruzd. Skok gwintu jest stały i wynosi $h = 195,7$ mm. Lufa została wykonana ze stali 50RA [14]. W układzie stosuje się nabój pośredni 5,45×39 mm. Masa pocisku używanego w tym naboju wynosi 3,42 g (rys. 2). Głównymi elementami wchodzącymi w skład pocisku, a które podlegały procesowi numerycznego modelowania są płaszcz, koszulka oraz rdzeń [1, 5].



Rys. 1. Lufa balistyczna na nabój 5,45×39 mm



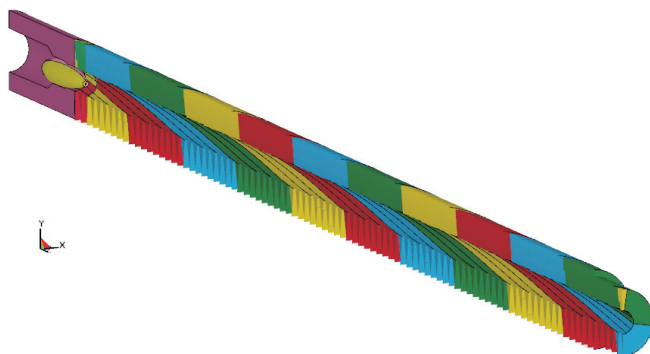
Rys. 2. Pocisk naboju pośredniego 5,45×39 mm oraz jego podstawowa charakterystyka geometryczna

3. Budowa modelu MES układu pocisk–lufa

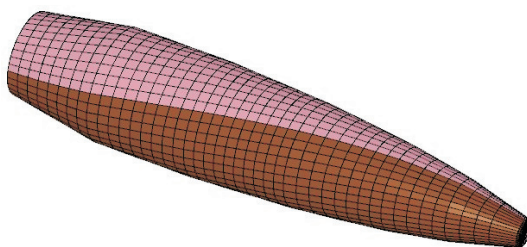
Proces tworzenia modelu MES lufy z bruzdami rozpoczyna się od utworzenia „plasterka” z bryłowych elementów skończonych. Elementy skończone w postaci „plasterków” tworzy się, łącząc siatki węzłów reprezentujące sąsiednie przekroje [10]. Wymiary elementów skończonych, zastosowanych do budowy modelu lufy,

wynikają z głębokości bruzd w lufie. W modelu MES ośmiowęzłowe elementy skończone mają proporcję najkrótszej krawędzi do najdłuższej jak 1:5. Przyjęcie takich stosunków wymiarowych zapewnia stabilność rozwiązania oraz decyduje o poprawności uzyskiwanych wyników na drodze symulacji numerycznej [6]. Na rysunku 3 przedstawiono podział na elementy skończone układu lufa–pocisk.

W badanym przypadku zastosowano model pocisku ze skrzyżnym ułożeniem siatki elementów skończonych (rys. 4) tak, aby dopasować jej kształt do geometrii bruzd w lufie. Każda z warstw elementów skończonych była obrócona względem warstwy elementów ją poprzedzających o kąt 5° .



Rys. 3. Model MES układu lufa–pocisk z bruzdami



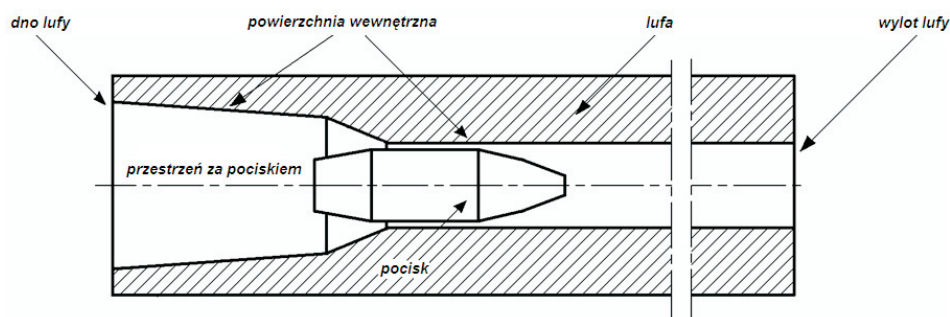
Rys. 4. Modele MES analizowanych pocisków z siatką dopasowaną do lufy z bruzdami

W badanym układzie numerycznym lufa–pocisk ciśnienie jest szybkozmiennym obciążeniem działającym w przestrzeni znajdującej się za strefą współpracy pocisku i lufy. W lufie ciśnienie działa na ściankę, gdy zostanie odsłonięta przez poruszający się pocisk [9, 10]. Strefa działania ciśnienia w lufie zwiększa się wraz z przemieszczaniem się pocisku. W przyjętym układzie zakłada się, że 100% energii gazów prochowych przekazywane jest na ruch pocisku i deformację ścianek lufy.

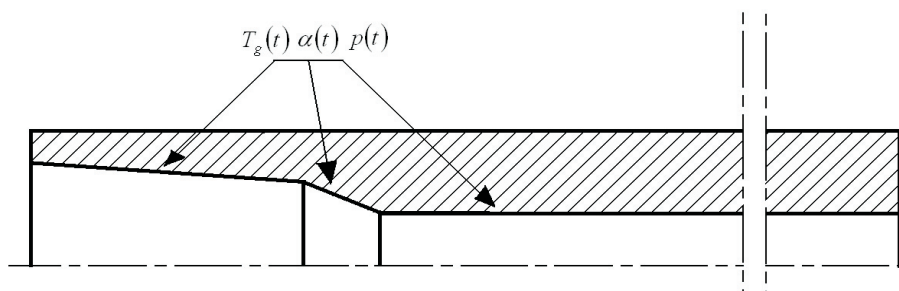
4. Model obliczeniowy z uwzględnieniem ruchomego pola temperatury i ciśnienia

W celu wyznaczenia temperatury na wewnętrznej powierzchni lufy posłużono się pakietem oprogramowania LS-DYNA umożliwiającym numeryczne rozwiązanie równania sprzężonego zagadnienia termomechanicznego.

W pojedynczym strzale w układzie lufy i pocisku procesy wymiany ciepła zachodzą w strefie za pociskiem tylko na przypowierzchniowej warstwie ścianki lufy (rys. 5). Pole temperatury i ciśnienia na powierzchni wewnętrznej przewodu lufy zostało opisane we współrzędnych kartezjańskich, tj. $T = T(x, y, z, t)$ i $p = p(x, y, z, t)$. Wymiana ciepła pomiędzy gazami prochowymi a powierzchnią przewodu lufy odbywa się drogą konwekcji.



Rys. 5. Model układu lufa-pocisk



Rys. 6 Model obliczeniowy

Obliczenia w przeprowadzonych analizach wykonano dla całego przewodu lufy (rys. 6). Uwzględnienie w lufie powiększającego się, ruchomego pola ciśnienia i temperatury podążającego za dnem pocisku daje możliwość uzyskania pełnego rozwiązania. Obliczenia były prowadzone we wszystkich przekrojach.

Uwzględniając przepływ ciepła w kierunku promieniowym oraz wzdłużnym lufy, przyjęto model z trójwymiarowym układem przewodnictwa ciepła. Biorąc

pod uwagę szybkozmienny charakter przepływu gazów prochowych w lufie, przyjęto warunki brzegowe trzeciego rodzaju w postaci zmiennych temperatur gazów prochowych i współczynnika przejmowania ciepła. Powierzchnia wymiany ciepła została ograniczona od wewnątrz polami, bruzdami oraz bocznymi ściankami bruzd. Przy powyższych założeniach uzyskuje się rozwiązania równania przewodnictwa, które można przedstawić w następujący sposób [4, 9, 11, 12, 17]:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

z warunkami brzegowymi

$$\lim_{\substack{x \rightarrow \zeta \\ y \rightarrow \eta \\ z \rightarrow \gamma}} \frac{\partial T}{\partial n} = -h(t) \left[T_g(t) - \lim_{\substack{x \rightarrow \zeta \\ y \rightarrow \eta \\ z \rightarrow \gamma}} T \right] \quad (2)$$

$$\lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ y \rightarrow \infty \\ z \rightarrow \infty}} \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

i warunkiem początkowym

$$\lim_{t \rightarrow 0} T(x, y, z, t) = 0, \quad (4)$$

gdzie: $T(x, y, z, t)$ — funkcja szukana (temperatura ścianki);
 x, y, z — współrzędne kartezjańskie;
 t — czas;

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$ — współczynnik wyrównania temperatury;

λ — przewodność cieplna;

c — ciepło właściwe;

ρ — gęstość materiału ścianki lufy;

n — normalna do powierzchni wewnętrznej lufy

oraz

$$h(t) = \frac{\alpha(t)}{\lambda}, \quad (5)$$

gdzie: $\alpha(t)$ — współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni przewodu lufy;
 $T_g(t)$ — temperatura gazów prochowych.

Ogólnie intensywność wymiany ciepła pomiędzy gazami prochowymi a ścianką lufy opisuje prawo Newtona [9, 12, 13]:

$$q = \alpha(T_g - T_s), \quad (6)$$

gdzie: q — natężenie strumienia ciepła przejmowanego przez powierzchnię nagrzewaną;
 α — współczynnik przejmowania ciepła;
 T_g — temperatura gazu (pływu) opływającego nagrzewaną (lub chłodzoną) powierzchnię;
 T_s — temperatura nagrzewanej (lub chłodzonej) powierzchni.

W przypadku wymiany ciepła, na powierzchni przewodu lufy należy brać pod uwagę zmienne w czasie t wartości współczynnika przejmowania ciepła α [9]:

$$\alpha(t) = C_1 \cdot D^{0,2} \cdot (\rho(t)w(t))^{0,8}, \quad (7)$$

gdzie: $D = \frac{273 + S}{T_g + S} \left(\frac{T_g}{273} \right)^{3/2}$ — wielkość zależna od temperatury T_g ;
 S — stała Sutherlanda;

$$C_1 = 0,0217 \cdot \left(\frac{\lambda_0}{d} \right) \cdot \left(\frac{d}{\eta_0} \right)^{0,8} \quad \text{— wielkość stała dla danej lufy i warunków ładowania;}$$

η_0, λ_0 — lepkość i przewodność cieplna gazów prochowych w temperaturze 0°C.

Dla gazów prochowych wartości η_0, λ_0 i S wynoszą odpowiednio: $1,456 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, $0,055 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ i 105 K [6, 9].

Z przedstawionych powyżej rozważań wynika, że współczynnik przejmowania ciepła w głównej mierze zależy od gęstości $\rho(t)$ i prędkości gazów prochowych $w(t)$.

Dostarczanie ciepła powoduje zmianę wymiarów obiektu, a więc wystąpienie odkształceń termicznych, które mogą wpłynąć na stan naprężenia w analizowanym obiekcie. Jeżeli obciążenie wywołuje odkształcenie konstrukcji, to pole temperatury będzie zależało od wielkości tych deformacji. Odwzorowanie tego problemu sprzężenia wymaga zastosowania równania różniczkowego termosprężystości o postaci [11]:

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \text{grad div } \bar{u} + \bar{X} = \gamma \text{grad } \Delta T + \rho \ddot{u}, \quad (8)$$

gdzie: ∇^2 — operator różniczkowy Laplace'a;

μ, λ — stałe Lamego;

u — wektor przemieszczenia;

$\gamma = (3\lambda + 2\mu)\alpha_t$;

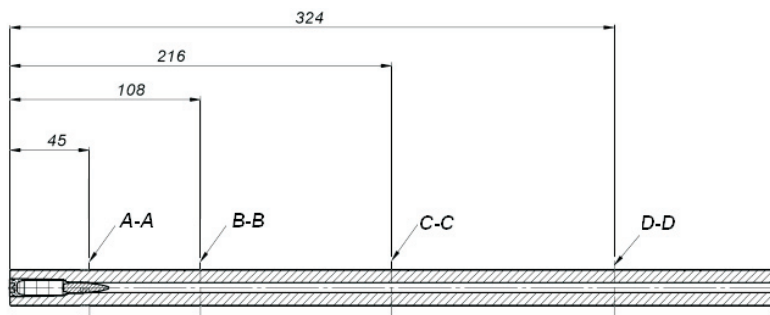
\bar{X} — siły masowe;

ΔT — zmiana temperatury;

ρ — gęstość ciała.

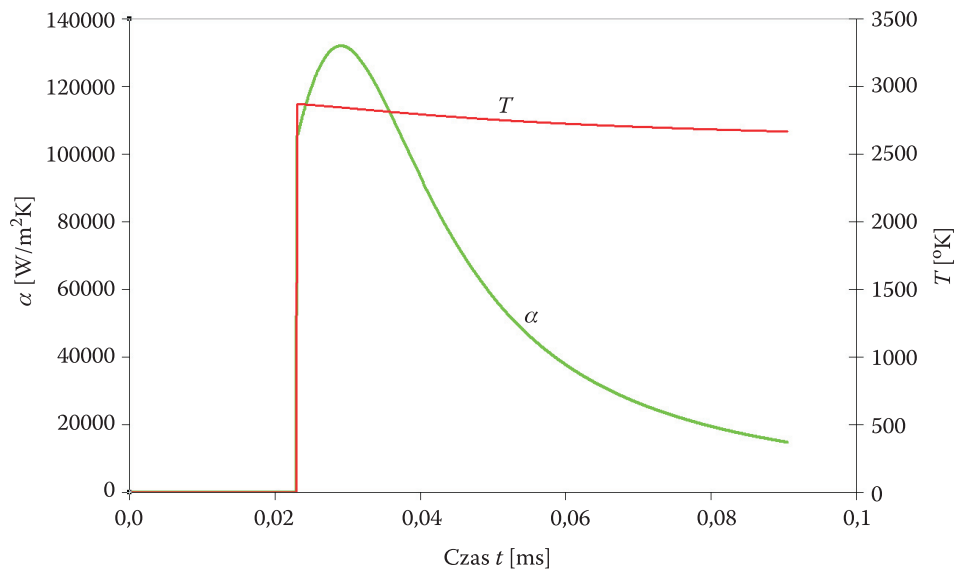
5. Wyniki obliczeń temperatury gazów prochowych oraz współczynnika przejmowania ciepła

Obliczenia przeprowadzono dla przekrojów w części wiodącej lufy w czterech przekrojach. Przekrój A-A umieszczono na początku stożka przejściowego, a pozostałe przekroje (tzn. B-B, C-C, D-D) umieszczono w równych odstępach wzdłuż części bruzdowanej przewodu lufy (rys. 7).

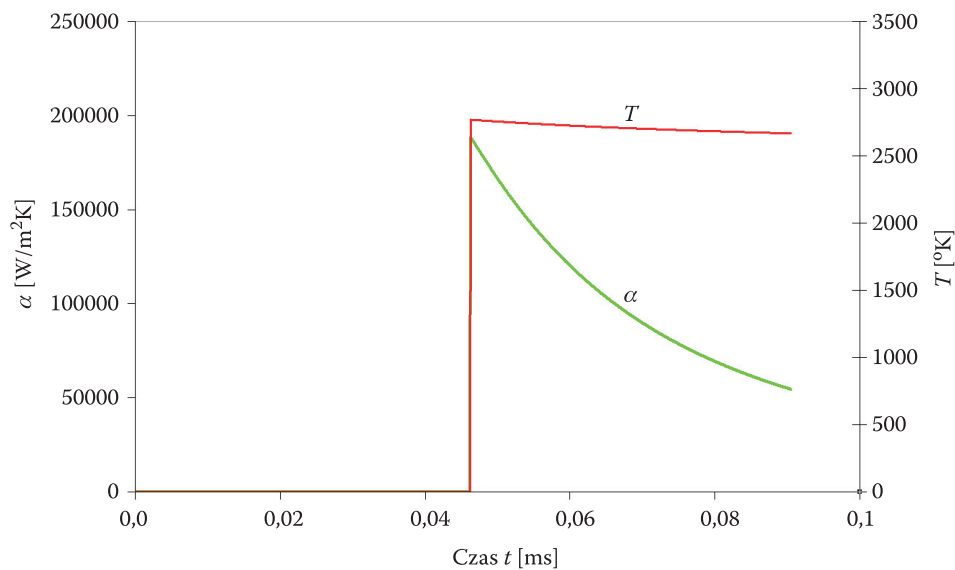


Rys. 7. Położenie wybranych przekrojów w lufie

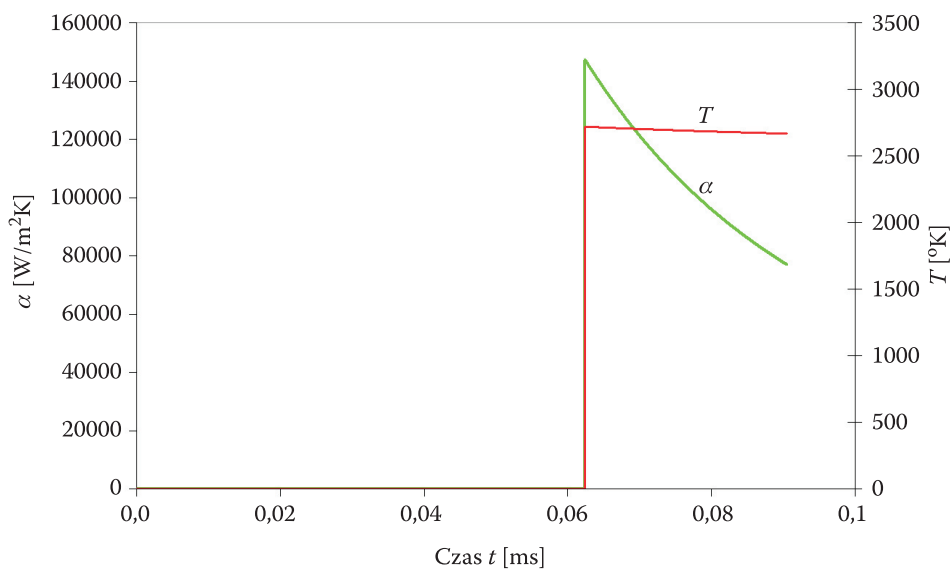
Charakterystyki zmian współczynnika przejmowania ciepła $\alpha(t)$ zostały wyznaczone na podstawie wcześniej obliczonych gęstości $\rho(t)$ i prędkości $w(t)$ gazów prochowych. Na rysunkach 8-11 zestawiono wykresy zmian temperatury T gazów prochowych i współczynnika $\alpha(t)$ przejmowania ciepła, które są niezbędne do obliczeń temperatury powierzchni wewnętrznej lufy w wybranych przekrojach.



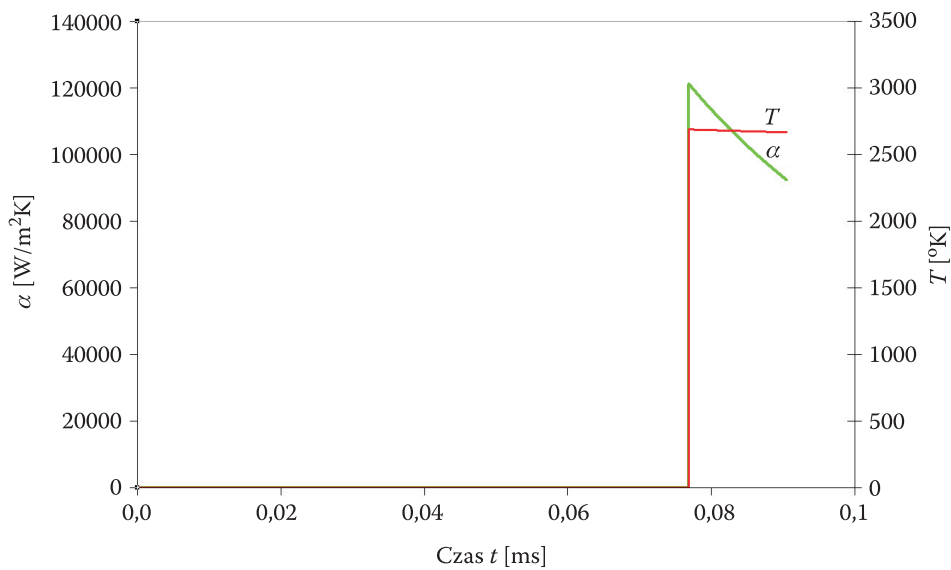
Rys. 8. Wykres zmian temperatury T gazów prochowych i współczynnika $\alpha(t)$ przyjmowania ciepła w przekroju A-A



Rys. 9. Wykres zmian temperatury T gazów prochowych i współczynnika $\alpha(t)$ przyjmowania ciepła w przekroju B-B



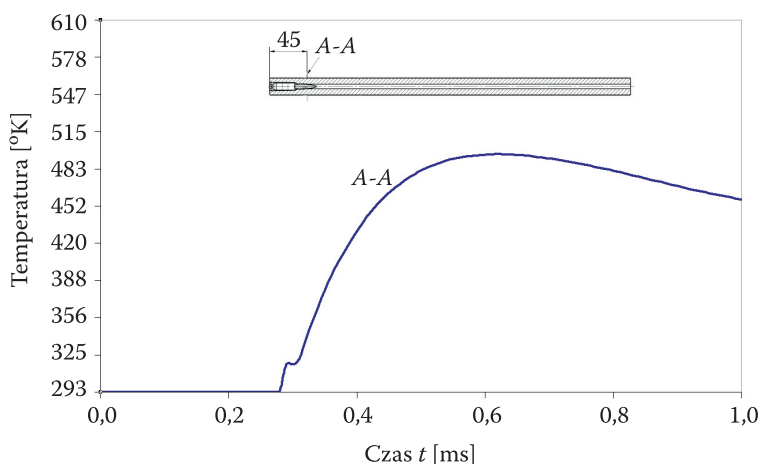
Rys. 10. Wykres zmian temperatury T gazów prochowych i współczynnika $\alpha(t)$ przyjmowania ciepła w przekroju C-C



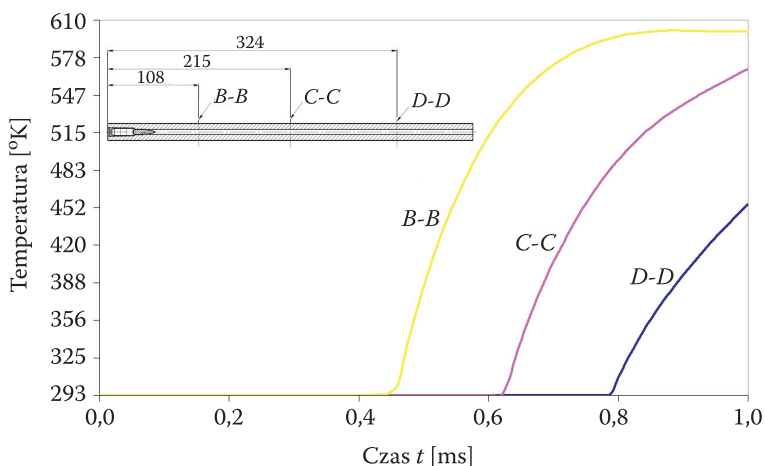
Rys. 11. Wykres zmian temperatury T gazów prochowych i współczynnika $\alpha(t)$ przyjmowania ciepła w przekroju D-D

6. Analiza numeryczna pełnego zagadnienia termomechanicznego obciążenia lufy

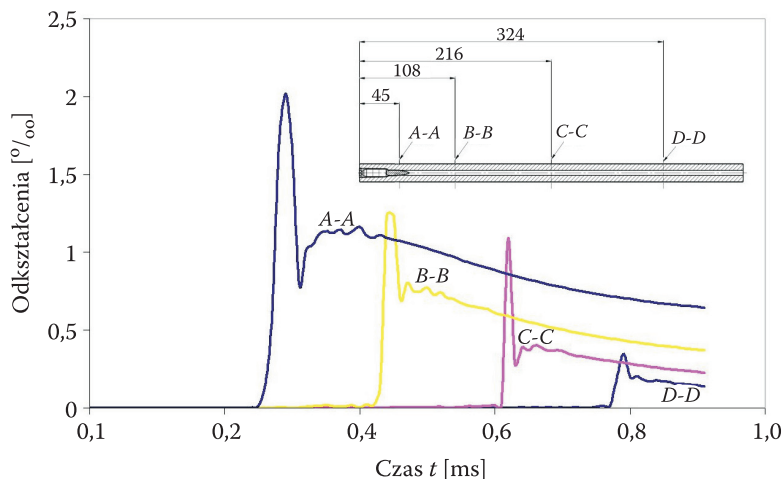
Rezultaty przeprowadzonych obliczeń niestacjonarnego zagadnienia termo-sprężystości zostały pokazane na rysunkach 12-14, gdzie przedstawiono zmiany temperatury powierzchni wewnętrznej ścianki lufy w przyjętych przekrojach: A-A, B-B, C-C oraz D-D. Gdy analizuje się zmiany temperatury w przekroju A-A ścianki



Rys. 12. Wykres zmian temperatury powierzchni wewnętrznej przewodu lufy podczas pojedynczego strzału dla wybranego przekroju znajdującego się w obszarze stożka przejściowego



Rys. 13. Wykres zmian temperatury powierzchni wewnętrznej przewodu lufy podczas pojedynczego strzału dla przekrojów znajdujących się w części prowadzącej przewodu lufy



Rys. 14. Wykresy zmian odkształcenia obwodowego powierzchni przewodu lufy dla przekrojów znajdujących się w części prowadzącej przewodu lufy

lufy (rys. 12), wyraźnie widoczny jest efekt działania przepływających gorących gazów prochowych gazów w okolicy stożka przejściowego między płaszczem pocisku a lufą. Dodatkowo wyraźnie widoczny jest efekt wzrostu temperatury ścianki stożka w wyniku odkształcenia się wewnętrznej ścianki lufy pod wpływem współpracy z pociskiem. Temperatury maksymalne ścianki lufy są uzyskiwane, gdy pocisk porusza się już w części wiodącej lufy [9].

Na rysunku 13 zaprezentowano rozkłady temperatury w dalszych przekrojach lufy, które są o 100-130 K wyższe od wartości obliczonych dla stożka przejściowego. Można stwierdzić, że w chwili przelotu pocisku przez lufę intensywniej nagrzewa się środkowy obszar części prowadzącej.

Na rysunku 14 przedstawiono wykresy zmian odkształcenia obwodowego powierzchni lufy dla przekrojów znajdujących w części prowadzącej przewodu lufy. W przekrojach A-A, B-B, C-C, D-D można zauważyć efekt działania pocisku na ścianki lufy oraz działania ciśnienia w strefie za pociskiem. Na podstawie obliczeń pokazanych na wykresach (rys. 14) można stwierdzić, że największe obciążenia występują w obszarze stożka przejściowego. Jest to spowodowane głównie odkształceniami wynikającymi z procesu plastycznego dopasowania się pocisku (płaszczka) do przekroju lufy. W dalszej części wpływ współpracy na proces odkształcenia się zmniejsza.

7. Wnioski

Analiza otrzymanych wyników pozwala stwierdzić, że temperatura ścianek lufy w okolicach stożka przejściowego oraz w części wiodącej wzrasta o kilkaset

stopni. Na efekt wzrostu temperatury ścianek lufy decydujący wpływ ma wartość współczynnika przejmowania ciepła, który jest funkcją dwóch parametrów, tj. prędkości i gęstości gazów prochowych. W zastosowanym modelu zjawiska strzału uwzględniono ruchome pole ciśnienia oraz temperatury, którego czoło porusza się wraz z pociskiem w lufie. Dzięki takiemu podejściu można badać wpływ obu tych wielkości nie tylko na ruch pocisku w lufie obciążonej cieplnie, ale również mechanicznie.

Z przeprowadzonych prac wynika, że zaproponowana metoda określania efektów termomechanicznych przedstawiona na przykładzie układu lufa–pocisk z uwzględnieniem ruchomego pola temperatury i ciśnienia gazów prochowych w przestrzeni za pociskiem, umożliwi analizowanie głównych czynników wpływających na dynamikę współpracy obiektów. Dodatkowo metoda pozwala otrzymywać wyniki, które są zbieżne z badaniami eksperymentalnymi przedstawionymi w pracach [10, 11].

Praca jest realizowana w ramach projektu nr 0T00B01429 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Artykuł wpłynął do redakcji 5.02.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2008 r.

LITERATURA

- [1] J. BRODAKCI, *Amunicja małokalibrowa*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1983.
- [2] M. DACKO, W. BORKOWSKI, S. DOBROCIŃSKI, T. NIEZGODA, M. WIECZOREK, *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Arkady, Warszawa, 1994.
- [3] R. DOMAŃSKI, M. JAWORSKI, M. REBOW, J. KOŁYŚ, *Wybrane zagadnienia z termodynamiki w ujęciu komputerowym*, PWN, Warszawa, 2000.
- [4] S. J. GDULI, *Przewodzenie ciepła*, praca zbiorowa, PWN, Warszawa, 1984.
- [5] E. GÓRSKI, *Podstawy technologii uzbrojenia*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1990.
- [6] J. O. HALLQUIST, *LS-Dyna. Theoretical manual*, California Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [7] K. JACH, *Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobodnych*, PWN, Warszawa, 1998.
- [8] W. JUNGOWSKI, *Podstawy dynamiki gazów*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1969.
- [9] R. KAMIŃSKI, *Balistyczno-termiczne uwarunkowania procesu zużywania się luf broni automatycznej*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2007.
- [10] J. MAŁACHOWSKI, J. ŁAZOWSKI, *Zagadnienie współpracy pocisku i lufy — ujęcie numeryczne*, *Mechanik*, nr 11, 2007, 958-959.
- [11] T. NIEZGODA, *Numeryczna analiza wybranych zagadnień termomechaniki*, rozprawa habilitacyjna, WAT, wewn. 2124, Warszawa, 1992.

- [12] B. STANISZEWSKI, *Wymiana ciepła podstawy teoretyczne*, PWN, Warszawa, 1980.
- [13] S. TORBA, *Niektóre zagadnienia obliczeń cieplnych luf*, Biul. WAT, 5/58.
- [14] S. TORECKI, *Balistyka wewnętrzna*, WAT, Warszawa, 1980.
- [15] S. TORECKI, *Silniki raketowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1984.
- [16] S. WIŚNIEWSKI, *Termodynamika techniczna*, WNT, Warszawa, 1999.
- [17] S. WIŚNIEWSKI, T. S. WIŚNIEWSKI, *Wymiana ciepła*, WNT, Warszawa, 2000.

J. ŁAZOWSKI, J. MAŁACHOWSKI, R. KAMIŃSKI

MES analysis of thermal loads during a shot

Abstract. Currently, the design process for armament equipment mostly employs well known and typical analytical methods. However, in many cases this kind of approach is not sufficient and effective, especially for gun parameters related to impact strength. In the contact areas between a bullet and a barrel, some thermo-mechanical phenomena appear. In such situations, a typical engineering approach in a design process is not sufficient to take into consideration all local and very complex effects. This paper presents a thermomechanical numerical analysis. The models of the bullet and barrel were developed using FE method. The main goal of the research was focused on an assessment of a temperature distribution in chosen sections of the barrel and an analysis of the strain state caused by the coupled thermomechanical loadings. Calculations were performed using the so-called direct-integration procedure, colloquially called the ‘explicit integration’ implemented in LS-Dyna code.

Keywords: barrel, bullet, numerical modelling, thermomechanical analysis

Universal Decimal Classification: 623.451