



Badania numeryczne dynamicznej odpowiedzi układu automatyki karabinka standardowego

KRZYSZTOF DAMAZIAK¹, JERZY MAŁACHOWSKI¹,
PAWEŁ PŁATEK², RYSZARD WOŹNIAK²

Wojskowa Akademia Techniczna, ¹Wydział Mechaniczny,
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej,

²Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Instytut Techniki Uzbrojenia,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2,

kdamaziak@wat.edu.pl, jerzy.malachowski@wat.edu.pl, pplatek@wat.edu.pl,
ryszard.wozniak@wat.edu.pl

Streszczenie. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie możliwości wykorzystania analizy numerycznej MES w procesie badania odpowiedzi zespołu automatyki karabinka podstawowego. W artykule scharakteryzowano opracowany do obliczeń model numeryczny oraz przyjęte w analizie MES warunki początkowo-brzegowe. Wykorzystanie metody elementów skończonych w procesie obliczeń numerycznych działania automatyki broni strzeleckiej pozwala na uwzględnienie szeregu dodatkowych czynników. Uwzględnia się takie zjawiska jak: dyssypacja energii w wyniku procesu tarcia, udział w bilansie energetycznym energii wewnętrznej, tłumienia, zależność sił tarcia w funkcji prędkości, drgania poszczególnych elementów układu, odwzorowanie dyssypacji energii przez zderzak elastomerowy itd. W wyniku przeprowadzonej analizy numerycznej dla układu bazowego, referencyjnego otrzymano charakterystyki kinematyczne i dynamiczne, które przedstawiono w postaci wykresów. W części końcowej pracy dokonano zestawienia otrzymanych charakterystyk kinematycznych i dynamicznych wyznaczonych dla podzespołu suwadła oraz porównano je z wynikami badań eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: broń strzelecka, broń automatyczna, karabinek, model numeryczny karabinka, analiza dynamiczna

1. Wprowadzenie

Prognozowanie odpowiedzi układu mechanicznego na wymuszenie o charakterze szybkozmiennym jest zagadnieniem złożonym, wymagającym stosowania

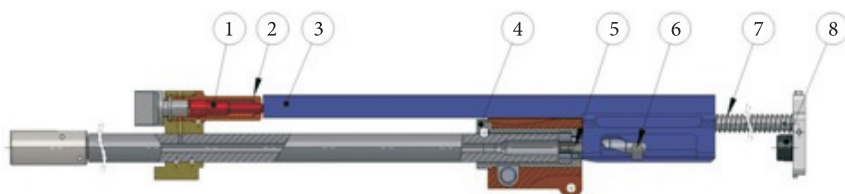
zaawansowanych metod numerycznych. Możliwości współczesnych pakietów obliczeniowych wspomagających prace w zakresie analiz inżynierskich pozwalają na komputerowe modelowanie obiektów w warunkach dynamicznej współpracy ciał. Przykład takiego procesu może stanowić zagadnienie wzajemnej współpracy części mechanicznych stanowiących układ automatyki broni strzeleckiej podczas strzału [1].

Zakład Konstrukcji Specjalnych Instytutu Techniki Uzbrojenia Wydziału Mechatroniki WAT we współpracy z Fabryką Broni „Łucznik” Radom realizował w latach 2007-2010 projekt rozwojowy, którego celem było opracowanie demonstratora technologii karabinka standardowego (w dwóch wariantach układu konstrukcyjnego) kalibru 5,56 mm stanowiącego bazę Modułowego Systemu Broni Strzeleckiej (MSBS-5,56). Zaproponowany sposób działania automatyki karabinków jest jednym z nowych rozwiązań, jakie wykorzystano podczas ich konstruowania. Działają one na zasadzie odprowadzania gazów prochowych przez boczny otwór w lufie z krótkim ruchem tłoka gazowego. Przyjęcie takiego rozwiązania pozwala na opracowanie integralnego, łatwo i szybko wymiennego podzespołu lufy. Zastosowane rozwiązanie, dotychczas niestosowane przez konstruktorów z fabryki broni, wymagało prowadzenia badań o charakterze numeryczno-eksperymentalnym w celu weryfikacji jego poprawności [2]. Niniejszy artykuł stanowi podsumowanie etapu pracy związanego z realizacją badań numerycznych nad układem automatyki broni za pomocą metody elementów skończonych [3, 4, 5]. W jego treści zawarto opis modelu numerycznego karabinka, warunków początkowo-brzegowych przyjętych podczas obliczeń, przedstawiono otrzymane wyniki w postaci charakterystyk kinematycznych i dynamicznych określonych dla podzespołu suwadła, stanów przemieszczeń i naprężeń wyznaczonych dla części najbardziej obciążonych.

Jakość otrzymanych wyników numerycznych zweryfikowano poprzez porównanie rozwiązania numerycznego (charakterystyk kinematycznych wyznaczonych dla podzespołu suwadła) z wynikami eksperymentalnymi (rejestracja przemieszczenia podzespołu suwadła podczas strzelania). Pomyślny wynik procesu walidacji modelu numerycznego umożliwił przeprowadzenie studium wrażliwości konstrukcji (mechanizmu) z uwzględnieniem szeregu czynników, tj. określenie wpływu zmiany parametrów masowo-bezwładnościowych podzespołu suwadła na jego charakterystyki dynamiczne oraz kinematyczne, określenie wpływu zmiany sztywności sprężyny mechanizmu powrotnego oraz jej wstępnego ugięcia na charakterystyki dynamiczne i kinematyczne suwadła, określenie wpływu zmiany właściwości mechanicznych materiału zderzaka elastomerowego oraz wpływu położenia samego zderzaka względem osi suwadła na jego charakterystyki dynamiczne oraz kinematyczne [6, 7, 8].

2. Charakterystyka modelu numerycznego karabinka podstawowego

Charakterystyczną cechą nowo projektowanego systemu broni strzeleckiej MSBS-5,56 jest m.in. modułowa budowa karabinków. Pozwala ona na konfigurowanie różnych rodzajów wzorów użytkowych broni w zależności od taktycznych wymagań pola walki (karabinek standardowy, subkarabinek, karabinek wyborowy, karabinek maszynowy). Komponentami bazowymi, które występują w obydwu wariantach konstrukcyjnych (klasycznym kolbowym oraz bezkolbowym bull-pup) w niezmienionej postaci, są następujące podzespoły: lufy, suwadła z zamkiem, komory zamkowej oraz mechanizmu powrotnego (rys. 1). W obydwu wariantach konstrukcyjnych zasada działania układu automatyki broni jest taka sama. Gazy prochowe powstające ze spalania ładunku prochowego przedostają się do komory gazowej i oddziałują na powierzchnię czołową tłoka gazowego (1). Tłok gazowy, przemieszczając się wewnątrz wkładki komory gazowej (2), wymusza ruch suwadła (3). Przemieszczające się suwadło krzywoliniowym wycięciem wykonanym w ścianie bocznej wymusza ruch wodzika zamka (6), który zmieniając swoje położenie, obraca zamek i umożliwia jego odryglowanie, a następnie wyciągnięcie z tulei ryglowej lufy (4). Konsekwencją dalszego przemieszczania się suwadła jest: wyciągnięcie z komory nabojeowej wystrzelonej łuski i jej wyrzucenie, napięcie sprężyny kurka oraz sprężyny mechanizmu powrotnego (7). W końcowym etapie odrzutu suwadło uderza w zderzak wykonany z elastomeru (8), a następnie pod wpływem energii skumulowanej w sprężynie powrotnej wraca do położenia wyjściowego. Końcowy etap ruchu suwadła związany jest z wprowadzeniem kolejnego naboju do komory nabojeowej, wymuszeniem obrotu zamka względem osi tulei ryglowej lufy.

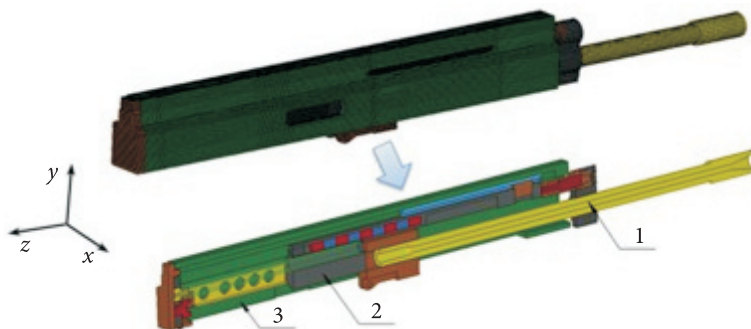


Rys. 1. Widok ogólny analizowanego układu automatyki karabinka: 1 — tłok gazowy; 2 — wkładka komory gazowej; 3 — suwadło; 4 — obsada lufy; 5 — zamek; 6 — wodzik zamka; 7 — sprężyna mechanizmu powrotnego; 8 — zderzak elastomerowy

W pierwszej fazie badań opracowano (na podstawie dokumentacji konstrukcyjnej demonstratora technologii) model numeryczny układu, w którym — ze względu na dużą złożoność geometryczną — poczyniono szereg uproszczeń [2]. Wprowadzone zmiany wiązały się z usunięciem cech, które nie wpływają na funkcjonalność oraz wytrzymałość poszczególnych części, a w znaczący sposób ułatwiły proces budowy modeli dyskretnych wchodzących w skład całego układu karabinka (najistotniejszym

uproszczeniem było wyeliminowanie elementu zamka). Zmiany te uwzględniono w opisie modelu numerycznego suwadła poprzez zwiększenie jego masy. Próba dokładnego odzwierciedlenia geometrii zamka oraz suwadła wymagała znacznego zredukowania wielkości elementów skończonych przyjętych do ich opisu. Na etapie obliczeń numerycznych, z uwagi na warunek stabilności rozwiązania, mogłoby to skutkować krokiem całkowania nawet na poziomie 10^{-9} 1/s. W konsekwencji zbudowany model całego układu w sposób znaczący wydłużyłby czas analiz komputerowych z dwóch do kilkunastu dni (symulacja jednego cyklu strzału).

Otrzymany model MES badanego układu zawiera 151 635 węzłów opisujących 105 224 elementy dyskretne. Model został podzielony na trzy podzespoły funkcjonalne: lufę z węzłem gazowym, suwadło oraz komorę zamkową (rys. 2). Do opisu modelu wykorzystano elementy ośmiowęzłowe, heksagonalne o liniowej funkcji kształtu [3, 4, 5].

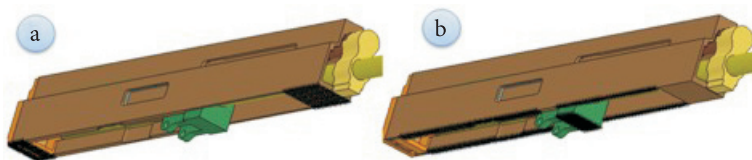


Rys. 2. Widok ogólny modelu numerycznego układu automatyki karabinka: 1 — podzespół lufy z węzłem gazowym; 2 — podzespół suwadła; 3 — podzespół komory zamkowej

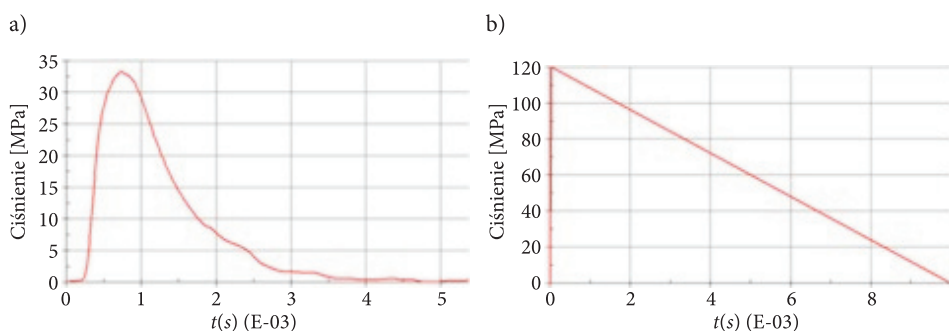
3. Definicja warunków początkowo-brzegowych dla opracowanego modelu numerycznego karabinka

Realizacja przemieszczeniowych warunków brzegowych miała na celu (rys. 3a) odzwierciedlenie sposobu zamocowania karabinka na stanowisku laboratoryjnym. Na rysunku 3b przedstawiono więzy narzucone z uwagi na sposób połączenia komory zamkowej z obsadą lufy oraz komorą spustową.

W celu zdefiniowania wzajemnej współpracy pomiędzy poszczególnymi częściami karabinka określono 43 pary kontaktowe. W analizowanym przypadku zagadnienie kontaktu pomiędzy poszczególnymi elementami mechanizmu karabinka zostało opisane z zastosowaniem metody obliczeniowej bazującej na funkcji kary [3, 5]. Wymuszeniem uruchamiającym działanie układu automatyki karabinka było ciśnienie działające na tłok gazowy oraz komorę gazową (rys. 3). Ponadto zdefiniowano obciążenie w postaci charakterystyki ciśnienia zmiennego w czasie, działającego na ścianki przewodu lufy zgodnie z przebiegiem przedstawionym na rysunku (rys. 3b).

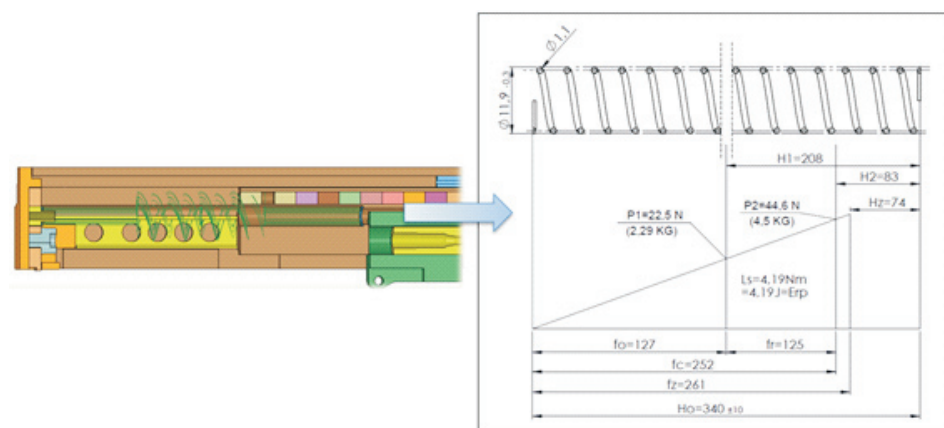


Rys. 3. Definiowanie warunku zamocowania karabinka na stanowisku laboratoryjnym oraz sposobu połączenia komory zamkowej z obsadą lufy i komorą spustową



Rys. 4. Przebieg charakterystyki ciśnienia: a) działającego w komorze gazowej oraz na tłok; b) wewnątrz przewodu lufy

Właściwości sprężyny mechanizmu powrotnego, tj. sztywność oraz siłę wynikającą ze wstępnego ugięcia, opisano za pomocą sprężystego elementu dyskretnego zgodnie z dokumentacją konstrukcyjną karabinka (rys. 5). Do opisu właściwości mechanicznych materiału poszczególnych części karabinka wykorzystano liniowy model konstytutywny. W przypadku zderzaka elastomerowego zastosowano



Rys. 5. Właściwości sprężyny mechanizmu powrotnego przyjęte podczas definiowania modelu numerycznego

model materiału „low_density_foam” [5] umożliwiający opis jego właściwości mechanicznych zgodnie z przebiegiem charakterystyki naprężenie-odkształcenie z uwzględnieniem zjawiska dyssypacji energii.

Realizację cyklu obliczeniowego działania układu automatyki broni przeprowadzono za pomocą pakietu obliczeniowego LS-Dyna [5]. Na podstawie informacji zawartych w pliku wsadowym program buduje dynamiczne równanie ruchu w postaci [3, 4, 5]:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t), \quad (2.1)$$

gdzie: M — macierz mas;

C — macierz tłumienia;

K — macierz sztywności struktury;

$\ddot{x}(t), \dot{x}(t), x(t)$ — wektor przyspieszenia, prędkości, przemieszczeń uogólnionych;

$F(t)$ — wektor sił zewnętrznych.

Macierze M , K i wektor F są określane w węzłowych układach współrzędnych poprzez agregację macierzy elementów. Macierz tłumienia C (tzw. model Rayleigha) definiuje się często jako funkcję zależną od macierzy bezwładności oraz macierzy sztywności [3, 4, 5]:

$$C = \alpha M + \beta K, \quad (2.2)$$

gdzie α , β są stałymi współczynnikami.

Powyższe równanie można uzupełnić warunkami początkowymi określonymi w chwili rozpoczęcia symulacji t_0 .

$$x(t = t_0) = x_0, \quad \dot{x}(t = t_0) = \dot{x}_0, \quad (2.3)$$

Wyznaczone równanie różniczkowe jest następnie całkowane w celu wyznaczenia przemieszczeń poszczególnych węzłów modelu. Równanie ruchu jest całkowane względem czasu metodą krok po kroku, w kolejnych chwilach poszukując rozwiązania w przedziale $[t_0, t_n]$. Całość rozwiązania uzyskuje się, zakładając jego podział na n przedziałów o długości Δt , zatem $n\Delta t = t_n - t_0$. Rozwiązania w metodzie numerycznego całkowania równania ruchu poszukuje się w postaci formuły rekurencyjnej. Wyznacza się stan przemieszczenia (prędkości, przyspieszenia) na podstawie stanu przemieszczenia (prędkości, przyspieszenia) w chwilach poprzednich. Zakłada się, że przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia układu znane są dla chwili początkowej, tj. $t = t_0$, i są równe $x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$. Oczywiście przyspieszenie $\ddot{x}(t)$ nie jest warunkiem początkowym i jest obliczane na podstawie warunków $\dot{x}(t), x(t)$ (np. przez spełnienie równania ruchu). W celu wyrażenia prędkości \dot{x} i przyspieszenia \ddot{x} w funkcji przemieszczenia stosuje się aproksymację różnicową pochodnych czasowych.

W metodzie różnic centralnych przyjmuje się [3, 5]:

$$\text{prędkość: } \dot{x}_{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t_{n+\frac{1}{2}}} (x_{n+1} - x_n), \quad (2.4)$$

$$\text{przyspieszenie: } \ddot{x}_n = \frac{1}{\Delta t_n} \left(\dot{x}_{n+\frac{1}{2}} - \dot{x}_{n-\frac{1}{2}} \right), \quad (2.5)$$

a równanie ruchu dla chwili czasu t_n dla przypadku nieliniowego ma wówczas postać [3, 5]:

$$M\ddot{x}_n = P_n - F_n^{int} - C\dot{x}_n, \quad (2.6)$$

gdzie: \dot{x}_n jest nieznaną wartością prędkości w chwili t_n . Zakłada się przy tym efekt asynchronicznego działania tłumienia w postaci takiej, że:

$$C\dot{x}_{n-\frac{1}{2}} \approx C\dot{x}_n. \quad (2.7)$$

Uaktualnioną wartość przyspieszenia opisuje równanie [3, 5]:

$$\ddot{x}_n = M^{-1} \left(P_n - F_n^{int} - C\dot{x}_{n-\frac{1}{2}} \right). \quad (2.8)$$

Uaktualnione formuły dla prędkości i przemieszczenia przedstawiają się odpowiednio [3, 5]:

$$\dot{x}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{x}_{n-\frac{1}{2}} + \Delta t_n \ddot{x}_n, \quad (2.9)$$

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t_{n+\frac{1}{2}} \dot{x}_{n+\frac{1}{2}}. \quad (2.10)$$

Powyższą procedurę nazywa się metodą całkowania jawnego i w celu znalezienia wartości przemieszczenia $x_{t+\Delta t}$ wykorzystuje się warunek dynamicznej równowagi układu w chwili t . Stabilność rozwiązania powyższego układu równań uzależniona jest koniecznością doboru długości kroku po czasie Δt w taki sposób, aby był on mniejszy-równy od pewnego czasu krytycznego Δt_{kr} , zależnego od własności całego badanego układu. Taką stabilność można uzyskać poprzez spełnienie warunku w postaci [3, 5]:

$$\Delta t \leq \Delta t_{kr} = \frac{T_N}{\pi}, \quad (2.11)$$

gdzie T_N jest najmniejszym okresem drgań własnych układu o N stopniach swobody.

W przypadku ośrodka ciała stałego z uwzględnieniem cech zarówno fizycznych, jak i mechanicznych tego ośrodka, poszukiwana wartość Δt_s musi spełniać

kryterium stabilności wyznaczone z następującej zależności bazującej na kryterium Couranta-Friedrichsa-Levy'ego [3, 5]:

$$\Delta t_s = \frac{L_e}{(Q + \sqrt{Q^2 + c^2})}, \quad (2.12)$$

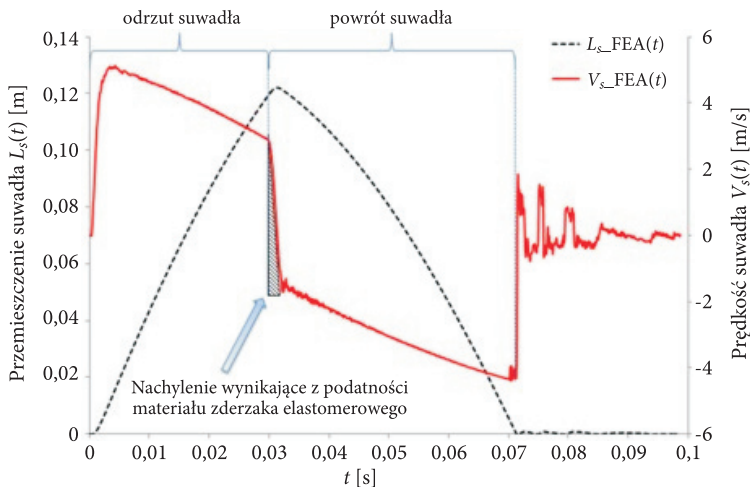
gdzie Q jest funkcją współczynników wiskotycznych C_0 i C_1 w następującej postaci [3, 5]:

$$Q = \begin{cases} C_1 c + C_0 L_e |\dot{\epsilon}_{kk}| < 0, \\ 0 & \text{dla } \dot{\epsilon}_{kk} \geq 0, \end{cases} \quad (2.13)$$

gdzie: $L_e = v_e / A_{e \max}$ — długość charakterystyczna elementu;
 v_e — objętość elementu;
 $A_{e \max}$ — powierzchnia największego boku elementu skończonego;
 c — lokalna prędkość dźwięku.

4. Wyniki analizy numerycznej działania układu automatyki karabinka

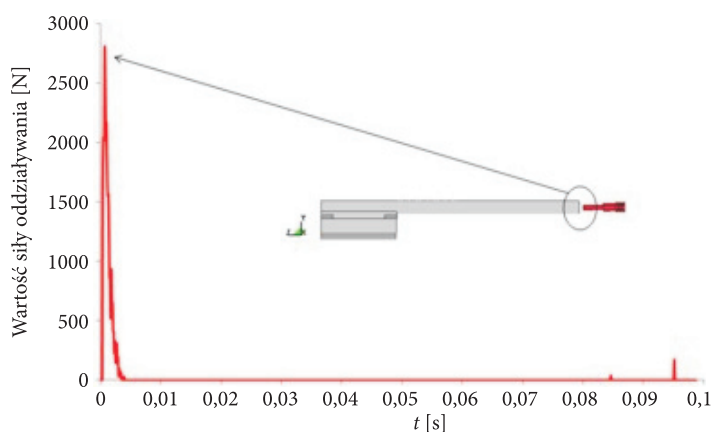
W wyniku przeprowadzonej symulacji komputerowej otrzymano rozwiązanie przedstawiające przebieg charakterystyk kinematycznych (rys. 6) oraz dynamicznych (rys. 7-9) wyznaczonych m.in. dla podzespołu suwadła. Ponadto ustalono wartości oraz



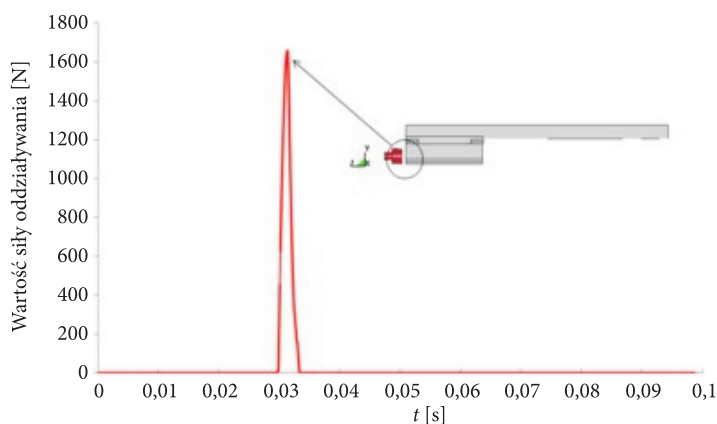
Rys. 6. Przebieg charakterystyk przemieszczenia $L_s(t)$ oraz prędkości $V_s(t)$ wyznaczonych dla podzespołu suwadła na kierunku osi OZ

charakter zmian naprężeń zredukowanych (wg. hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego, w skrócie HMM) dla tłoka gazowego i suwadła.

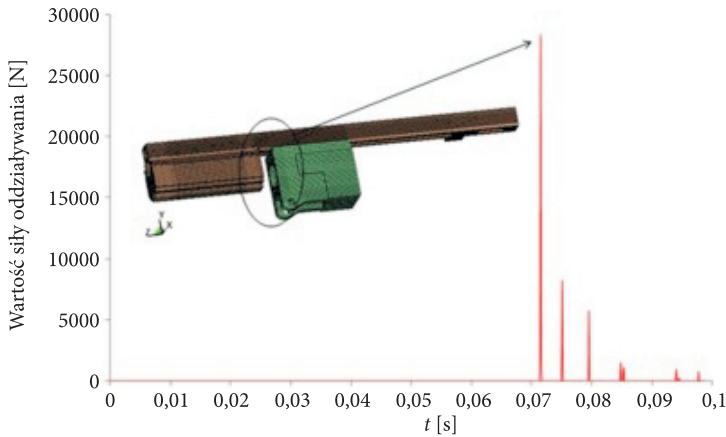
Analizując przebieg charakterystyk dynamicznego oddziaływania suwadła z tłokiem gazowym (rys. 7), zderzakiem (rys. 8) oraz obsadą lufy (rys. 9), można zaobserwować, iż mają one charakter impulsowy. Największą wartość siły wyznaczono dla chwili czasu, kiedy suwadło wraca w przednie położenie i uderza w obsadę lufy oraz tłok gazowy. Efektem uderzenia jest wprowadzenie układu w drgania oraz powstanie lokalnych stanów naprężeń zarówno w elemencie tłoka gazowego jak i w suwadle. Wartości naprężeń zredukowanych określonych dla tłoka gazowego w charakterystycznych obszarach jego geometrii zaznaczonych na rysunku 10 indeksami „2” oraz „3” mogą powodować jego uszkodzenie mechaniczne. Zredukowanie



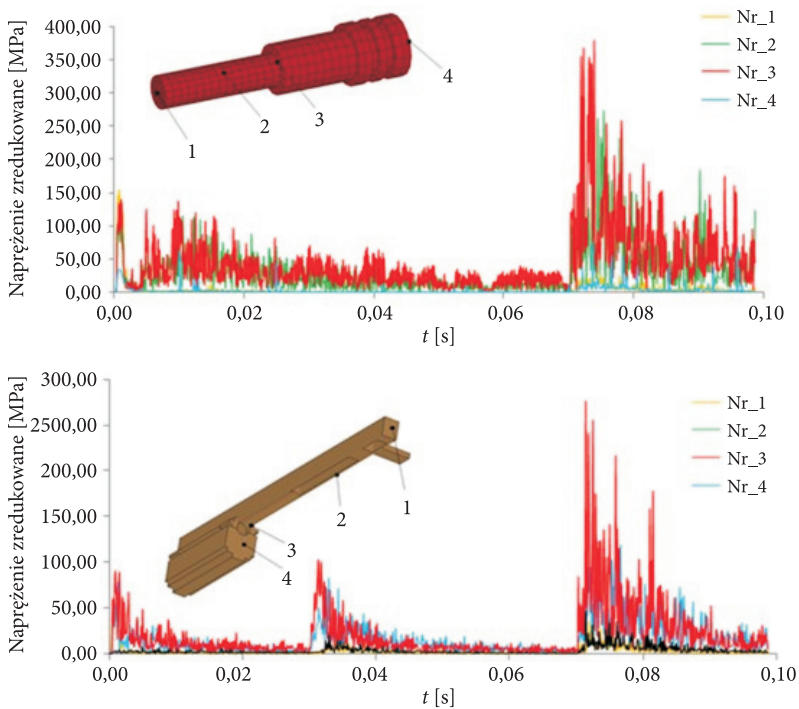
Rys. 7. Przebieg charakterystyki dynamicznego oddziaływania suwadła z tłokiem gazowym (na kierunku osi OZ)



Rys. 8. Przebieg charakterystyki dynamicznego oddziaływania suwadła ze zderzakiem elastomerowym (na kierunku osi OZ)



Rys. 9. Przebieg charakterystyki dynamicznego oddziaływania suwadła z obsadą lufy (na kierunku osi OZ)



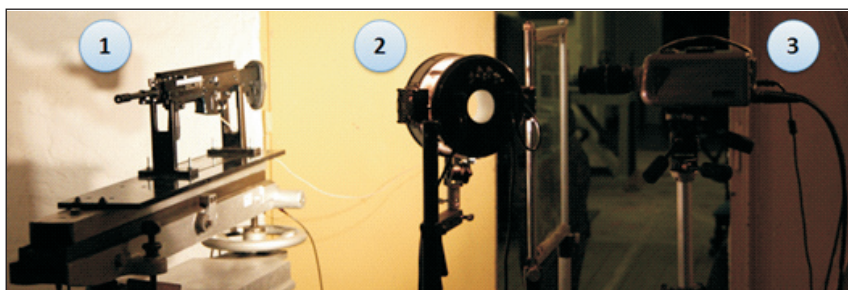
Rys. 10. Przebieg zmiany naprężeń zredukowanych wg hipotezy HMM określonych dla podzespołu tłoka gazowego oraz suwadła

ich wartości jest możliwe przez zmianę sposobu podparcia tłoka wewnątrz wkładki komory gazowej oraz zmianę geometrii tłoka w części współpracującej z suwadłem. Poddając analizie wartości naprężeń określonych dla suwadła, można zaobserwować,

iż największe stany wytężenia występują w obszarach zaznaczonych indeksami „2” oraz „3” na rysunku 10. Powstają one w wyniku wyboczenia oraz zginania występu suwadła współpracującego z tłokiem gazowym.

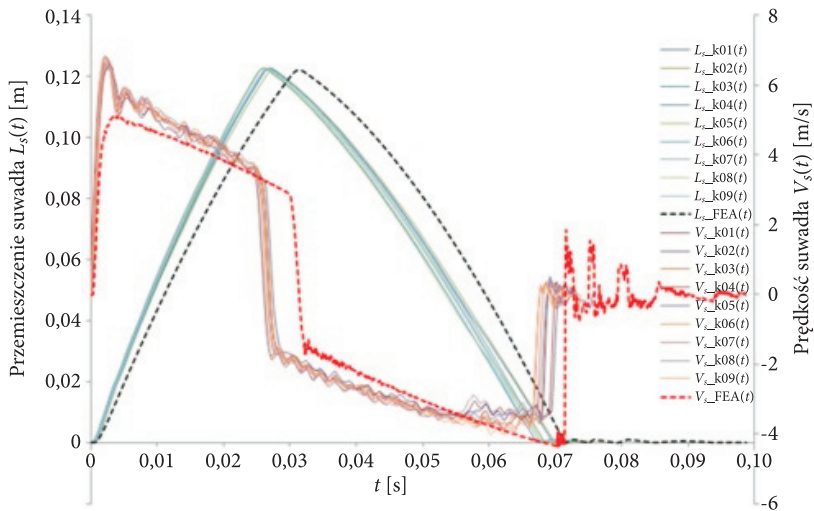
5. Badania doświadczalne układu automatyki karabinka oraz walidacja rozwiązania numerycznego

Weryfikacja poprawności rozwiązania numerycznego wymagała przeprowadzenia dodatkowych badań eksperymentalnych. Polegały one na wielokrotnym strzelaniu z karabinka podstawowego ogniem pojedynczym oraz ciągłym z jednoczesną rejestracją przemieszczenia podzespołu suwadła za pomocą kamery do zdjęć szybkich (rys. 11). Na podstawie wielokrotnych prób zarówno dla ognia pojedynczego, jak i ciągłego otrzymano dane w postaci filmów. Analiza otrzymanych danych w środowisku programu TEMA Motion 2D pozwoliła na wyznaczenie charakterystyki przemieszczenia oraz prędkości (w wyniku różniczkowania krzywej przemieszczenia) dla podzespołu suwadła. Wyniki badań doświadczalnych porównano z rozwiązaniem numerycznym określonym metodą elementów skończonych (rys. 12).



Rys. 11. Widok ogólny stanowiska doświadczalnego: 1 — karabinek podstawowy zamocowany do podstawy; 2 — oświetlacz; 3 — kamera do zdjęć szybkich FANTOM

Przyjęte na etapie modelowania uproszczenia geometryczne, brak modelu numerycznego zamka, uniemożliwiają odwzorowanie dokładnego charakteru zmiany krzywej prędkości z uwzględnieniem procesu odryglowywania zamka (rys. 12). Dla modelu numerycznego suwadło w chwili początkowej ma większą masę (uwzględniającą masę zamka), w związku z tym przemieszcza się ono wolniej, później następuje uderzenie w zderzak elastomerowy oraz jego powrót do położenia początkowego. Analizując kąt nachylenia odcinków krzywej prędkości odwzorowujące etap odrzutu suwadła, jego oddziaływania ze zderzakiem oraz powrót, można zauważyć, że właściwości sztywności modelu rzeczywistego karabinka zostały odwzorowane prawidłowo.



Rys. 12. Porównanie wyników analizy numerycznej FEA z wynikami doświadczalnymi: L_s FEA(t) — przemieszczenie suwadła określone numerycznie; V_s FEA(t) — prędkość suwadła określona numerycznie; $V_s k(t)$ — prędkość suwadła określona doświadczalnie strzelaniem; $L_s k(t)$ — przemieszczenie suwadła określone doświadczalnie strzelaniem

Wykonanie analizy działania układu automatyki karabinka oraz walidacja opracowanego modelu numerycznego poprzez badania doświadczalne umożliwiły prowadzenie dalszych badań, których celem było studium wrażliwości konstrukcji broni z uwzględnieniem szeregu czynników tj. określenie wpływu zmiany parametrów masowo-bezwładnościowych podzespołu suwadła na jego charakterystyki dynamiczne oraz kinematyczne, określenie wpływu zmiany sztywności sprężyny mechanizmu powrotnego oraz jej wstępnego ugięcia na charakterystyki dynamiczne i kinematyczne suwadła, określenie wpływu zmiany właściwości mechanicznych materiału zderzaka elastomerowego oraz wpływu położenia samego zderzaka względem osi suwadła na jego charakterystyki dynamiczne oraz kinematyczne.

6. Wnioski

Przeprowadzone badania numeryczne układu automatyki karabinka podstawowego umożliwiły określenie charakteru jego odpowiedzi na wymuszenie w postaci impulsu ciśnienia działającego na elementy znajdujące się wewnątrz węzła gazowego oraz na wnętrze przewodu lufy. Zastosowana metoda badań numerycznych pozwoliła określić przebieg charakterystyk kinematycznych, przemieszczenia oraz prędkości elementów ruchomych układu, tj. suwadło oraz tłok gazowy, wyznaczyć dynamiczny charakter wzajemnego oddziaływania pomiędzy poszczególnymi częściami analizowanego układu. Ponadto, ustalone stany naprężeń zredukowanych

dla analizowanych podzespołów konstrukcyjnych karabinka umożliwiły ich ocenę pod względem wytrzymałości. Na ich podstawie zaproponowano modyfikację geometrii części najbardziej wyężonych m.in. tłoka gazowego oraz suwadła. Dzięki temu zredukowano efekt lokalnych koncentracji stanów naprężeń.

Pomyślny rezultat przeprowadzonego procesu walidacji modeli numerycznych pozwolił na podjęcie dalszych badań nad układem automatyki broni związanych z realizacją studium wrażliwości. Badania te pozwolą określić wpływ zmiany parametrów masowo-bezwładnościowych podzespołu suwadła na jego charakterystyki dynamiczne oraz kinematyczne, wpływ zmiany sztywności sprężyny mechanizmu powrotnego oraz jej wstępnego ugięcia na charakterystyki dynamiczne i kinematyczne suwadła, wpływ zmiany właściwości mechanicznych materiału zderzaka elastomerowego oraz wpływu położenia samego zderzaka względem osi suwadła na jego charakterystyki dynamiczne oraz kinematyczne [6, 7, 8]. Na ich podstawie zostaną dobrane wartości parametrów poddanych analizie gwarantujące poprawność funkcjonowania układu automatyki broni.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt rozwojowy.

Artykuł wpłynął do redakcji 17.01.2012 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2012 r.

LITERATURA

- [1] J. ŁAZOWSKI, J. MAŁACHOWSKI, *Modelowanie zagadnienia sprzężenia w środowisku ALE na przykładzie układu pocisk-lufa*, Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia i Bezpieczeństwa, t. 1, rozdz. 2, WAT, 2008, 285-299.
- [2] K. DAMAZIAK, J. MAŁACHOWSKI, P. PŁATEK, R. WOŹNIAK, *Analiza możliwości wykorzystania różnych metod numerycznych w procesie projektowania układu automatyki broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm*, Mechanik, 2, 2011, 120-123.
- [3] T. BELYTSCHKO, W.K. LIU, B. MORAN, *Nonlinear finite elements for continua and structures*, John Wiley & Sons, England, 2000.
- [4] M. KLEIBER, *Metoda elementów skończonych w nieliniowej mechanice kontinuum*, PWN, Warszawa-Poznań, 1985.
- [5] J.O. HALLQUIST, *LS-Dyna. Theoretical manual*, California Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [6] K. DAMAZIAK, J. MAŁACHOWSKI, P. PŁATEK, R. WOŹNIAK, *Badania wpływu zmiany parametrów masowo-bezwładnościowych podzespołu suwadła na charakterystyki kinematyczne karabinka standardowego*, XV Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Jurata 09-13.V.2011, Mechanik, 7, 2011.
- [7] K. DAMAZIAK, J. MAŁACHOWSKI, P. PŁATEK, R. WOŹNIAK, *Badania wpływu sztywności sprężyny powrotnej suwadła w aspekcie dynamicznej odpowiedzi układu automatyki karabinka standardowego*, XV Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Jurata 09-13.V.2011, Mechanik, 7, 2011.
- [8] K. DAMAZIAK, J. MAŁACHOWSKI, P. PŁATEK, R. WOŹNIAK, *Badania sztywności materiału zderzaka suwadła w aspekcie dynamicznej odpowiedzi układu automatyki karabinka standardowego MSBS-5,56, XVIII, Biul. Naukowy WITU, Problemy Techniki Uzbrojenia*, 2011.

K. DAMAZIAK, J. MAŁACHOWSKI, P. PŁATEK, R. WOŹNIAK

Numerical study of standard assault rifle dynamic response

Abstract. The main goal of the paper is to present the possibility of FE analysis in a process of investigation of modular small arms system dynamic response. The numerical model developed during computation process and initial-boundary conditions are described. The authors decided to use the FE method due to its ability to include in simulations such effects as: dissipation energy of friction, internal energy participation in total energy result, damping process, relationship between force of friction and velocity function, vibrations, deformation of bumper material. The results of analysis such as kinematic and dynamic characteristic are presented on the plots. Displacement and velocity of slide are compared with experimental results. In the final part of the paper, the conclusions are drawn.

Keywords: small arms, automatic assault rifle, numerical model of assault rifle, dynamic analysis