WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA im. Jarosława Dąbrowskiego WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ





ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Przemysław BADUROWICZ

(imiona i nazwisko dyplomanta)

Analiza numeryczno-eksperymentalna pistoletu PW INKA działającego na zasadzie krótkiego odrzutu lufy

(tytuł rozprawy doktorskiej)

Nauki inżynieryjno-techniczne, inżynieria mechaniczna

(dziedzina nauki, dyscyplina naukowa)

płk dr hab. inż. Przemysław KUPIDURA

(stopień wojskowy/naukowy, imię i nazwisko promotora pracy)

WARSZAWA - 2022 r.

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania, za życzliwą pomoc, cenne rady i liczne wskazówki merytoryczne udzielone mi w trakcie realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej, mojemu promotorowi Panu płk. dr. hab. inż. Przemysławowi Kupidurze oraz Panu mjr. dr. inż. Bartoszowi Fikusowi.

SPIS TREŚCI

WY	KAZ SYMBOLI I OZNACZEŃ	5
1.	WSTĘP	9
1.1.	Wprowadzenie	9
1.2.	Opis zasady działania automatyki broni opartej o krótki odrzut lufy	12
1.3.	Historia stosowania zasady krótkiego odrzutu lufy	14
1.4.	Cel i zakres pracy	21
1.5.	Geneza pracy	22
2.	ANALIZA DZIAŁANIA AUTOMATYKI BRONI Z UŻYCIE METODY UKŁADÓW WIELOCZŁONOWYCH	² M 23
2.1.	Budowa modelu numerycznego na potrzeby metody układów wieloczłonowych.	23
2.2.	Wyniki obliczeń metodą układów wieloczłonowych	32
3. ANALIZA DZIAŁANIA AUTOMATYKI BRONI Z UŻYCI		
	METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH	35
3.1.	Budowa bazowego modelu numerycznego	35
3.2.	Budowa rozszerzonego modelu numerycznego	41
3.3.	Wyniki obliczeń kinematyki broni metodą elementów skończonych	43
3.4.	Wyniki obliczeń naprężeń występujących w broni	45
3.5.	Analiza wrażliwości modeli MES na rozmiar elementów siatki	48
4.	BADANIA EKSPERYMENTALNE BRONI, OKREŚLEN CHARAKTERYSTYK KINEMATYCZNYCH	IE 51
4.1.	Opis zastosowanej metody badawczej oraz stanowiska pomiarowego	51
4.2.	Przedstawienie i analiza wyników	54
5.	WALIDACJA MODELI TEORETYCZNYCH	61
5.1.	Walidacja modelu MUW	61
5.2.	Walidacja modelu MES	63
6.	ANALIZA PARAMETRYCZNA WPŁYWU WYBRANYC	CH
	CHARAKTERYSTYK KONSTRUKCYJNYCH N	NA
	KINEMATYKĘ BRONI	67
6.1.	Wpływ masy zamka na charakterystyki kinematyczne	67
6.2.	Wpływ sprężyny powrotnej na charakterystyki kinematyczne	72
6.3.	Wpływ drogi odrzutu lufy na charakterystyki kinematyczne	77

6.4.	Wpływ oporów kurka oraz przerywacza na charakterystyki kinematyczne
6.5.	Wpływ oporów dosyłania kolejnego naboju z magazynka oraz wyciągania i wyrzucania łuski na charakterystyki kinematyczne
6.6.	Wpływ współczynników tarcia na charakterystyki kinematyczne
6.7.	Wpływ siły oporów pocisku w lufie na charakterystyki kinematyczne
6.8.	Wpływ ciśnienia gazów prochowych na charakterystyki kinematyczne
7.	PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE OPRACOWANYCH METOD
	NUMERYCZNYCH95
7.1.	Badania prototypu pistoletu
7.2.	Charakterystyka funkcjonowania "automatyki" pistoletu PW INKA 101
8.	PODSUMOWANIE107
8.1.	Wnioski ogólne 107
8.2.	Wnioski szczegółowe 107
8.3.	Wnioski aplikacyjne
8.4.	Wykorzystanie wyników w konstrukcji pistoletu PW INKA 108
8.5.	Elementy oryginalne wykonanych prac 109
8.6.	Plany badawcze na przyszłość 109
9.	LITERATURA111
STR	ESZCZENIE
ABS	5TRACT

WYKAZ SYMBOLI I OZNACZEŃ

ā	– średnia arytmetyczna
a_i	– wartość <i>i</i> -tego pomiaru
a_{max}	– najwyższa wartość pomiaru w zbiorze wyników
a_{min}	 najniższa wartość pomiaru w zbiorze wyników
С	– prędkość dźwięku w materiale
CAD	- komputerowe wspomaganie projektowania (ang. Computer Aided Design)
CAE	 komputerowe wspomaganie obliczeń inżynierskich (ang. Computer Aided
	Engineering)
C.I.P	 Permanent International Commission for the Proof of Small Arms
ckm	– ciężki karabin maszynowy
c_{max}	 współczynnik tłumienia wiskotycznego
CMOS	 – complementary metal oxide semiconductor
d	– głębokość wzajemnej penetracji, przy której tłumienie jest równe c_{max}
D	– głębokość penetracji
D ₁₀₀	 – średnica okręgu zawierającego 100% przestrzelin, o środku w średnim punkcie
	trafienia
е	 wykładnik głębokości penetracji
E_0	– energia początkowa pocisku
E ₁₀	 – energia kinetyczna pocisku na dystansie 10 m od wylotu lufy
f	 współczynnik bezpieczeństwa kroku czasowego
F_0	 – siła statycznego oddziaływania pocisku z łuską
F_{01}	 maksymalna siła dynamicznego oddziaływania pocisku z łuską
FEM	 finite element method
F_{ka}	– siła kontaktu w funkcji kary
F_{kon}	– siła normalna kontaktowa
F_{kk}	 – siła oddziaływania łuski z komorą nabojową
F_n	– kontaktowa siła normalna
F_p	 – siła od ciśnienia gazów prochowych działająca na dno łuski;
F_{pl}	– siła rozcalania pocisku z łuską
F_{pl}	– siła przetłaczania pocisku przez przewód lufy
F_{sk}	– siła napięcia sprężyny kurka
F_{sm}	– siła napięcia sprężyny magazynka
F_{sp}	 – siła napięcia sprężyny mechanizmu powrotnego
F_{ss}	– siła napięcia sprężyny szyny spustowej
F _{sw}	– siła napięcia sprężyny wyciągu
F_T	– kontaktowa siła styczna,
Fwm	– siła wcinania się pocisku w bruzdy przewodu lufy
G	– poczatkowy moduł spreżystości poprzecznej (Moduł Kirchhoffa)
Gan	– szczeliny miedzy ścianami, krawedziami i wezłami siatki elementów znajdujących
	sie w kontakcie
h	– wymiar charakterystyczny elementu skończonego

HMH	 – hipoteza wytężeniowa Hubera-Misesa-Hencky'ego
I_1	– niezmiennik tensora deformacji
J	– Jakobian
k_{kon}	– sztywność kontaktowa
K_n	 – sztywność kontaktowa w kierunku normalnym
K_T	 – sztywność kontaktowa w kierunku stycznym
l _{wtłocz}	 – głębokość wtłoczenia pocisku w łuskę
MBA	– multi body analysis
MES	 metoda elementów skończonych
M_F	– masa efektywna powierzchni
M_N	– masa efektywna węzła
MUW	 metoda układów wieloczłonowych
п	– liczba pomiarów
Ν	– siła nacisku
Р	– siła przesuwająca
PC	– punkt celowania
p_{max}	– maksymalne ciśnienia gazów prochowych
p_o	– powiększenie obiektywu
q	– droga względna powierzchni kontaktowych
ģ	– prędkość względna powierzchni kontaktowych
q_0	 droga, po której następuje kontakt członów
R	– rozstęp
rkm	– ręczny karabin maszynowy
$R_{t_{po}}$	– rozstęp czasów ruchu powrotnego zamka
R_{t_w}	 rozstęp czasów ruchu wstecznego zamka
R_{v_p}	– rozstęp prędkości zamka pozostałej przy zderzaku
$R_{v_{pomax}}$	 rozstęp prędkości maksymalnych zamka w ruchu powrotnym
$R_{v_{wmax}}$	 rozstęp prędkości maksymalnych zamka w ruchu wstecznym
S	 – odchylenie standardowe z próby
S	– parametr nieściśliwości
$S_{t_{po}}$	 – odchylenie standardowe czasu ruchu powrotnego zamka
s_{t_w}	 – odchylenie standardowe czasu ruchu wstecznego zamka
s_{v_p}	 odchylenie standardowe prędkości zamka pozostałej przy zderzaku
$S_{v_{pomax}}$	– odchylenie standardowe prędkości maksymalnej zamka w ruchu powrotnym
$S_{v_{wmax}}$	– odchylenie standardowe prędkości maksymalnej zamka w ruchu wstecznym
SA/DA	- mechanizm spustowy podwójnego działania (ang. Single Action/ Double Action)
SAAMI	- Sporting Arms and Ammunition Manufacturers' Institute
S&B	– Sellier & Bellot
ŚPT	– średni punkt trafienia
t	– czas
T_d	– tarcie dynamiczne
t_n	– czas dla pomiaru <i>n</i>

– czas dla pomiaru <i>n-1</i>
 – czas ruchu powrotnego zamka
 – średnia arytmetyczna czasów ruchu powrotnego zamka
 najwyższa wartość czasu ruchu powrotnego zamka
 najniższa wartość czasu ruchu powrotnego zamka
- tarcie statyczne
– czas ruchu wstecznego zamka
 – średnia arytmetyczna czasów ruchu wstecznego zamka
 najwyższa wartość czasu ruchu wstecznego zamka
 najniższa wartość czasu ruchu wstecznego zamka
– względne przemieszczenie w kierunku normalnym w miejscu styku
 względne przemieszczenie w kierunku stycznym
 układy wieloczłonowe
– prędkość początkowa pocisku
- średnia arytmetyczna prędkości początkowej pocisków z dziesięciu strzałów
 prędkość pocisku na dystansie 10 m od wylotu lufy
 graniczna prędkość tarcia dynamicznego
– prędkość w chwili pomiaru <i>n</i>
– prędkość zamka pozostała przy zderzaku
 średnia arytmetyczna prędkości zamka pozostałej przy zderzaku
 najwyższa wartość prędkości zamka pozostałej przy zderzaku
– najniższa wartość prędkości zamka pozostałej przy zderzaku
– prędkość maksymalna zamka w ruchu powrotnym
– średnia arytmetyczna prędkości maksymalnych zamka w ruchu powrotnym
– najwyższa wartość prędkości maksymalnej zamka w ruchu powrotnym
– najniższa wartość prędkości maksymalnej zamka w ruchu powrotnym
 prędkość maksymalnego tarcia statycznego
– wzajemna prędkość trących powierzchni
 – wzajemna prędkość trących powierzchni odpowiadająca współczynnikowi tarcja u
– predkość maksymalna zamka w ruchu wstecznym
– średnia arytmetyczna predkości maksymalnych zamka w ruchu wstecznym
– najwyższa wartość predkości maksymalnej zamka w ruchu wstecznym
– najniższa wartość prędkości maksymalnej zamka w ruchu wstecznym
– wzór
- droga
– droga dla pomiaru n
– droga dla pomiaru <i>n-1</i>
– stałe tłumienia Rayleigh'a
– stałe tłumienia Rayleigh'a
– współczynnik proporcjonalności

Δs	– zmiana położenia obrazu plamki świetlnej na powierzchni światłoczułej detektora
Δt	– krok czasowy
Δt_{po}	 zmiana czasu ruchu powrotnego zamka w stosunku do czasu nominalnego
Δt_w	– zmiana czasu ruchu wstecznego zamka w stosunku do czasu nominalnego
ΔV_0	 rozstęp prędkości początkowych pocisków
Δv_p	– zmiana prędkości pozostałej zamka przy zderzaku w stosunku do prędkości
	nominalnej
Δv_{poma}	x^{-} zmiana prędkości maksymalnej zamka w ruchu powrotnym w stosunku do
	prędkości nominalnej
Δv_{wmax}	z – zmiana prędkości maksymalnej zamka w ruchu wstecznym w stosunku do
	prędkości nominalnej
Δz	 zmiana położenia powierzchni wzdłuż kierunku propagacji wiązki laserowej
μ	– współczynnik tarcia
μ_1	 znana wartość współczynnika tarcia
μ_d	 – współczynnik tarcia dynamicznego
μ_s	 współczynnik tarcia statycznego
arphi	 kąt między kierunkiem wiązki laserowej i osią optyczną obiektywu
ξ	– współczynnik tłumienia
Ψ	– funkcja energii odkształcenia
ω_1	– początek zakresu częstotliwość
ω2	 koniec zakresu częstotliwości
[<i>C</i>]	 macierz tłumienia układu elementów skończonych równa sumie macierzy
	tłumienia poszczególnych elementów
[K]	 macierz sztywności układu elementów skończonych równa sumie macierzy
	sztywności poszczególnych elementów
[M]	 macierz bezwładności układu elementów skończonych równa sumie macierzy
	bezwładności poszczególnych elementów

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Rosnące wymagania stawiane broni strzeleckiej, wymuszają stosowanie obliczeń numerycznych, które ograniczają ryzyko wystąpienia błędów konstrukcyjnych już na etapie projektowania broni. Wynikiem analiz numerycznych są charakterystyki kinematyczne i dynamiczne elementów automatyki oraz stan naprężeń występujący w częściach podczas ich pracy, co jest kluczowym zagadnieniem przy prowadzeniu prac badawczo-rozwojowych nad nowymi wzorami broni. Dostępna literatura porusza zagadnienia związane z bronią opartą o różne zasady działania automatyki. Do najbardziej rozpowszechnionych i najliczniej opisanych należą: odprowadzanie gazów prochowych przez boczny otwór w lufie [1-37], odrzut zamka swobodnego [38-40], krótki odrzut lufy [41-44] oraz odrzut zamka półswobodnego [45].

Przykładem literatury dotyczacej broni działającej na zasadzie odprowadzania gazów prochowych przez boczny otwór w lufie jest rozprawa doktorska [1], skupiająca się na opracowaniu metody badawczej opartej na obliczeniach numerycznych, metodą układów wieloczłonowych (MUW) oraz metodą elementów skończonych (MES) dla karabinka MSBS-5,56. Wymuszeniem podczas obliczeń jest ciśnienie gazów prochowych zmierzone na stanowisku laboratoryjnym, co zapewnia doskonałe warunki do oceny fizykalnej poprawności Autor przeprowadza walidację sformułowanych modelu teoretycznego. modeli numerycznych, porównując uzyskane wyniki obliczeń z danymi uzyskanymi na drodze badań eksperymentalnych. Dzięki zwalidowanemu modelowi numerycznemu, wykonuje studium zmiany właściwości masowo-bezwładnościowych suwadła, sztywności sprężyny powrotnej oraz właściwości mechanicznych zderzaka suwadła.

Zagadnienia poruszone w pracy [1] są również dodatkowo opisywane w opracowaniach [2-10]. Autorzy w artykule [2] przeprowadzają analizę możliwości wykorzystania metod numerycznych, MES i MUW do obliczeń automatyki broni. W pracach [3, 4] opisano badania numeryczne odpowiedzi układu automatyki karabinka za pomocą MES przy ogniu pojedynczym [3] i seryjnym [4]. W artykule [5] zawarto opis badań numerycznych, metodą układów wieloczłonowych kinematyki karabinka. Tą samą metodą przebadano układ tłoka gazowego z suwadłem na potrzeby pracy [6]. Zagadnienie wpływu zmian parametrów masowo-bezwładnościowych oraz sztywności sprężyny powrotnej na charakterystyki kinematyczne broni poruszono w artykułach [7, 8]. Praca [9] przedstawia możliwości MES przy badaniu automatyki karabinka w zależności od przyjętych właściwości mechanicznych materiału zderzaka. Wstępną analizę dynamicznego oddziaływania tłoka gazowego z suwadłem opisano w opracowaniu [10].

Autorzy artykułów [11-14] badają problematykę węzła gazowego metodami teoretycznymi jak i eksperymentalnymi. Rozpatrują wpływ jego parametrów konstrukcyjnych, takich jak średnica otworu węzła gazowego, średnica otworu węzła regulacyjnego, początkowa objętość komory gazowej oraz średnica tłoka gazowego.

Artykuły [15-22] zawierają analizę pracy automatyki broni działającej na zasadzie odprowadzania gazów prochowych przez boczny otwór w lufie oraz pracę mechanizmów

broni. W literaturze [23-25] opisano modele termodynamiczne oraz balistyczne dla tej zasady działania. Opracowania [26-37] dotyczą podrzutu oraz odrzutu karabinka MSBS-5,56.

Praca [38] zawiera model balistyki wewnętrznej oraz model funkcjonowania części i mechanizmów 9 mm pistoletu maszynowego wz. 98 (PM – 98) z zamkiem swobodnym. Dokonano przeglądu sposobów modelowania balistyki wewnętrznej, rozpatrzono problem określenia siły odziaływania pocisku z lufą, wymiany ciepła między gazami prochowymi a ścianką lufy oraz określono charakterystyki materiału miotającego. Ponadto odwzorowano geometrię kluczowych elementów broni techniką skanowania trójwymiarowego, aby możliwe było obliczenie charakterystyk kinematycznych broni metodą układów wieloczłonowych za pomocą programu komputerowego. Przeprowadzono też badania eksperymentalne charakterystyk balistycznych układu miotającego i kinematycznych układu automatyki broni oraz dokonano walidacji modeli teoretycznych.

W rozprawie [39] opisano badania wpływu ręki strzelca na kinematykę broni krótkiej z zamkiem swobodnym. Badania prowadzone były dla pistoletu P-64 CZAK. W ramach pracy wykonano pomiar ciśnienia gazów prochowych, badania współpracy łuski z komorą nabojową, badania momentu bezwładności pocisku i pistoletu, rzeczywistych przemieszczeń liniowych i kątowych zamka oraz szkieletu w funkcji czasu. Opracowano równania ruchu elementów pistoletu, określono siły działające w trakcie pracy automatyki broni i co było celem głównym pracy, wyznaczono oddziaływanie ręki strzelca na pistolet.

Podobną pracą do [39] jest artykuł [40], który przedstawia matematyczny model pistoletu trzymanego w ręku, którym również jest P-64 CZAK. Dynamiczne równania ruchu wyprowadzono przy użyciu formalizmu równań Lagrange'a drugiego rodzaju. Określono siły i momenty działające na ludzką rękę podczas strzału.

Opracowanie [41] dotyczy metody tworzenia i badania modelu symulacyjnego działka lotniczego NR-30 działającego na zasadzie krótkiego odrzutu lufy z przyspieszaczem odrzutu zamka. W badaniach wykorzystano programy CAD/CAE do stworzenia modeli oraz przeprowadzenia symulacji układów kinematycznych i dynamicznych metodą układów wieloczłonowych, co pozwoliło uzyskać informację o skutkach zmian wartości parametrów diagnostycznych w ocenie jego trwałości i niezawodności. Uzyskano wyniki prędkości zespołu uderzeniowego w zależności od różnych prędkości odrzutu lufy oraz w zależności od zmian geometrii przyspieszacza na skutek zużywania się tej części.

Artykuł [42] podobnie jak [41] dotyczy również działka lotniczego NR-30. Autorzy również przedstawiają metodę badania działka opartą na obliczeniach przy użyciu oprogramowania CAD/CAE, nie tylko w oparciu o metodę układów wieloczłonowych, ale rozszerzając ją o metodę elementów skończonych w celu określenia naprężeń w wybranych częściach działka. Przedstawiono przykładowe wielkości kinematyczne i dynamiczne dla wybranych części otrzymane poprzez przeprowadzenie symulacji oraz przykładowe wyniki obliczeń wytrzymałościowych.

W artykule [43] opisano mechanizm zamkowy broni z krótkim odrzutem lufy z przyspieszaczem odrzutu zamka na przykładzie działka lotniczego NS-23. Autor skupia się na analizie pracy działka przed i po modyfikacji przyspieszacza, która ma za zadanie zmniejszenie energii odrzutu zespołu ruchomego. Celem tego zabiegu jest redukcja występującego naprężenia w elementach broni, zwiększenie ich trwałości, zmniejszenie

energii oddziaływania broni na platformę będącą jej nosicielem oraz zwiększenie celności działka.

Praca [44] przedstawia wstępny model fizyczny i matematyczny broni działającej na zasadzie krótkiego odrzutu lufy z przyspieszaczem. Model uwzględnia okresy charakterystyczne działania automatyki, umożliwia przeprowadzenie symulacji prędkości odrzutu poszczególnych elementów zespołu odrzucanego w zależności od parametrów konstrukcyjnych układu.

Artykuł [45] zawiera opis wad i zalet broni działającej na zasadzie odrzutu zamka półswobodnego, hamowanego poprzez zastosowanie rolek, na podstawie wzorów produkowanych przez wytwórnię Heckler & Koch. W opracowaniu zawarto również elementy obliczeń automatyki broni oraz opis omawianej zasady działania.

W dostępnych źródłach uwidacznia się jednak deficyt opracowań dotyczących broni działających na zasadzie krótkiego odrzutu lufy, a zwłaszcza bez przyspieszacza odrzutu zamka. Takie rozwiązanie jest powszechnie stosowane w pistoletach, w szczególności zasilanych nabojem 9x19 mm Parabellum, ze względu na dużą energię początkową pocisku. Z tego powodu warto prowadzić badania nad tą zasadą, co będzie szczególnie przydatne do prowadzenia prac rozwojowych nad nowymi wzorami broni.

Najlepiej do tych celów użyć najnowszych technik obliczeń komputerowych, wykorzystując oprogramowanie CAD/CAE. Najczęściej przy symulacjach związanych z bronią strzelecką spotyka się oprogramowanie wykorzystujące metodę układów wieloczłonowych [1, 2, 5-8, 38, 41, 42, 46-59] oraz metodę elementów skończonych [1-4, 9, 42, 59-63].

Ważnym zagadnieniem w przypadku obliczania automatyki broni przy lufie ruchomej, co ma miejsce przy krótkim jej odrzucie i zostanie opisane w dalszej części, jest siła oddziaływania pocisku z lufą [38, 39, 64-78]. Autor rozprawy [39] wyznacza siły oddziaływania pocisku z lufą metodą doświadczalno-analityczną dla naboju 9x18 mm Makarow. Siłę wcinania pocisku w bruzdy lufy przyjmuje na podstawie badań eksperymentalnych metodą quasi-statyczną. Pozostałe siły składowe siły oporu przetłaczania pocisku oblicza analitycznie. Autorzy prac [64-72] przeprowadzają obliczenia MES, określając stan naprężeń w lufie i pocisku dla niesprecyzowanych bliżej, co do kalibru nabojów karabinowych i pośrednich. Opracowania [73, 74] skupiają się na amunicji 5,56x45 mm, gdzie praca [73] polega na wyznaczeniu siły przetłaczania pocisku przez przewód lufy metoda eksperymentalna w warunkach guasi-statycznych, a [74] na określeniu naprężeń w pocisku i lufie metodą elementów skończonych. Artykuł [75] koncentruje się na wyznaczeniu oporu przetłaczania pocisku przez lufę w warunkach dynamicznych, panujących podczas strzału, metodą doświadczalno-analityczną. Zagadnienie rozwiązano w ujęciu energetycznym, określając straty energii gazów prochowych na przetłoczenie pocisku w funkcji drogi, dla amunicji 9x19 mm oraz 5,56x45 mm. W pracy [76] przeprowadzono badania eksperymentalne w warunkach quasi-statycznych dla różnych rodzajów pocisków 7,62x51 mm i różnych luf, określono siłę przetłaczania w funkcji drogi. Autorzy artykułów [77, 78] skupiają się na amunicji 9x19 mm. Opracowanie [77] dotyczy wyznaczenia sił oddziaływania metodą eksperymentalną oraz MES w warunkach quasi-stycznych, a także MES w warunkach dynamicznych, podobnie jak w rozprawie [38]. Artykuł [78] przedstawia wyniki obliczeń naprężeń metodą elementów skończonych w pocisku i lufie, wyniki pomiarów odkształceń pocisku rzeczywistego i pocisku z symulacji oraz porównanie tych odkształceń.

1.2. Opis zasady działania automatyki broni opartej o krótki odrzut lufy

Najprostszą z zasad działania automatyki broni jest odrzut zamka swobodnego, jego ograniczeniem jest masa zamka, która musi mieć odpowiednio dużą wartość, tak aby łuska w czasie kiedy ciśnienie w lufie nie spadnie jeszcze do bezpiecznej wartości nie wysunęła się z komory nabojowej na tyle, aby doszło do jej rozerwania (spełnienie warunku bezpieczeństwa). Z tego powodu zasadę tę stosuje się w pistoletach strzelających przy użyciu amunicji o energii początkowej pocisku do ok. 350 J lub przy silniejszych nabojach w pistoletach maszynowych, gdzie można zastosować cięższy zamek. Przy silniejszych nabojach w pistolecie, masa zamka musiała by mieć na tyle dużą wartość, że masa całej broni była by zbyt wysoka, co sprawia, iż zasada ta traci praktyczne zastosowanie, dlatego należy stosować inne rozwiązania [79]. W pistoletach strzelających przy użyciu amunicji 9x19 mm, o energii początkowej od 542 do 814 J (przy strzale ze standardowej lufy balistycznej) [80, 81], najczęściej spotyka się krótki odrzut lufy.

Broń działająca na zasadzie odrzutu lufy cechuje się tym, iż zamek jest zaryglowany i rozpoczyna ruch razem z lufą. W rozwiązaniach konstrukcyjnych spotykany jest długi oraz krótki odrzut lufy. W pierwszym wariancie, lufa wykonuje ruch na taką samą odległość jak zamek. W przypadku drugim, długość jej ruchu jest mniejsza niż długość ruchu zamka [79, 82-84].

Przy krótkim odrzucie lufy strzał przebiega następująco (rys. 1.1):

- a) Po zapaleniu się prochu, ciśnienie w lufie wzrasta (1) napędzając pocisk (2) oraz w przeciwnym kierunku zamek (3) z lufą (1), działając poprzez dno łuski (4) na czółko zamka (3) (rys. 1.1a).
- b) Po odbyciu stosunkowo niewielkiej drogi przez zamek (3) z lufą (1) (mniejsza niż cały ruch zamka) oraz opuszczeniu lufy (1) przez pocisk (2) i spadku ciśnienia panującego w lufie (1) do wartości ciśnienia atmosferycznego lub bliskiego atmosferycznemu, następuje odryglowanie zamka (3) z lufą (1) (rys. 1.1b).
- c) Lufa (1) z zamkiem (3) pod wpływem działania siły bezwładności cofają się ściskając (przez cały ruch wsteczny) sprężynę powrotną (5). Gdy występuje przyspieszacz (6), zwiększa się prędkość ruchu zamka (3) względem lufy (1) (rys. 1.1c). Przyspieszacz (6) stosowany jest przy zamkach o dużej masie.
- d) Lufa (1) osiągając tylne położenie zatrzymuje się, lub gdy posiada swoją sprężynę (7), zaczyna wracać do przedniego położenia. Podczas wstecznego ruchu zamka (3) następuje napięcie mechanizmu uderzeniowego oraz wyrzucenie łuski (4). Po osiągnięciu przez zamek (3) tylnego położenia, rozpoczyna się jego ruch powrotny pod wpływem siły rozprężania się uprzednio napiętej sprężyny powrotnej (5) (rys. 1.1d).
- e) Wracający zamek (3) dosyła kolejny nabój (8) do komory nabojowej (rys. 1.1e). W końcowej fazie ruchu zamek (3) rozpoczyna proces ryglowania z lufą (1) i razem z nią wraca w przednie położenie, pod warunkiem, że lufa (1) nie wróciła wcześniej na skutek działania siły sprężyny lufy (7) [79, 82-84].

Ryglowanie zamka może być realizowane przez przekoszenie lufy, obrót lufy, rygiel wahliwy, za pomocą mechanizmu kolankowo-dźwigniowego oraz przez przesunięcie (przekoszenie) zamka. Na rysunku 1.1 schematycznie przedstawiono proces ryglowania, przy wykorzystaniu rygla (9).



Rys. 1.1. Schemat działania broni wykorzystującej krótki odrzut lufy: 1 – lufa, 2 – pocisk, 3 – zamek, 4 – łuska, 5 – sprężyna powrotna, 6 – przyspieszacz, 7 – sprężyna lufy, 8 – kolejny nabój dosyłany do komory nabojowej, 9 – rygiel

1.3. Historia stosowania zasady krótkiego odrzutu lufy

Zasada działania automatyki broni oparta na krótkim odrzucie lufy została po raz pierwszy wykorzystana w karabinie maszynowym Maxima, skonstruowanym w 1883 roku przez Hiriama Stevensa Maxima, prototyp tej broni powstał w 1884 roku. Ryglowanie odbywało się za pomocą haka związanego z zamkiem. Lufa była chłodzona wodą, zasilanie odbywało się z taśmy parcianej o pojemności 333 nabojów lub 96 nabojowego magazynka bębnowego. W kolejnych latach pojawiło się wiele wzorów tego karabinu różniących się sposobem ryglowania, wprowadzono ryglowanie za pomocą układu kolankowodźwigniowego, rodzajami podstaw i wieloma drobniejszymi modyfikacjami. Niezmienna natomiast została zasada działania karabinu.

Przy wspomnianym już układzie kolankowo-dźwigniowym (rys. 1.2), lufa (1) przemieszcza się razem z suwadłem (2). W komorze zamkowej (3) znajduje się zamek (4), który połączony jest z dźwignią kątową (5), a ta z dźwignią zamkową (6), wszystkie połączenia realizowane są za pośrednictwem osi (7, 8, 9). Odryglowanie jest możliwe poprzez "złamanie" mechanizmu, dzięki współpracy osi łączącej (9) z krzywką w komorze zamkowej (3), która kieruje oś (9) w dół komory zamkowej (3).

Najpopularniejszymi wzorami km Maxima były niemieckie: ckm wz. 1908, rkm wz. 1908/15, rkm wz. 1908/18, wszystkie kalibru 7,92 mm; angielski 7,7 mm ckm wz. 1909; rosyjski 7,62 mm ckm wz. 1910; polski 7,92 mm ckm wz. 1910/28 [83, 85].



Rys. 1.2. Schemat działania automatyki km Maxima ryglowanego za pomocą układu kolankowodźwigniowego: linia ciągła – zamek w przednim położeniu, linia kreskowana – zamek w tylnym położeniu, 1 – lufa, 2 – suwadło, 3 – komora zamkowa, 4 – zamek, 5 – dźwignia kątowa, 6 – dźwignia zamkowa, 7 – oś w suwadle, 8 – oś w zamku, 9 – oś łącząca dźwignie [83]

Najliczniejsze zastosowanie zasada krótkiego odrzutu lufy znalazła w pistoletach, w tym również w pistolecie wzorcowym PW INKA, będącym przedmiotem niniejszej pracy, dlatego też dalsza część historii rozwoju konstrukcji broni strzeleckiej, działającej na tej zasadzie została poświęcona pistoletom.

Pierwszym pistoletem, w którym zastosowano krótki odrzut lufy był Borchardt C93 (rys. 1.3), opracowany w 1893 roku przez Hugo Borchardta. Pistolet ten jest ryglowany za pomocą mechanizmu kolankowo-dźwigniowego (1). Lufa (2) jest sztywno zamocowana w suwadle (3) i porusza się razem z nim. Odryglowanie zamka (4) następuje w chwili, gdy mechanizm kolankowo-dźwigniowy (1) zostaje "złamany" na skutek jego współpracy z krzywką w szkielecie (5). Zasilany nabojem 7,65x25 mm Borchardt, z jednorzędowego wymiennego magazynka (6) o pojemności 8 nabojów. Sprężyna powrotna (7) umieszczona została w tylnej części szkieletu (5) i ma postać sprężyny spiralnej, która jest skręcana w trakcie ruchu zamka (4). Pistolet posiada igliczny mechanizm uderzeniowy.

Pistolet Borchardt został zmodyfikowany przez Georga Lugera, jednak zasada jego działania pozostała niezmieniona, nowo powstała broń o nazwie P08 Parabellum zyskała dużą popularność i była zasilana obecnie najbardziej rozpowszechnionym nabojem 9x19 mm Parabellum. Została przyjęta do uzbrojenia armii niemieckiej w 1908 roku [86].



Rys. 1.3. 7,65 mm pistolet Borchardt C93: a) zamek w przednim położeniu, b) zamek w tylnym położeniu, 1 – mechanizm kolankowo-dźwigniowy, 2 – lufa, 3 – suwadło, 4 – zamek, 5 – szkielet, 6 – magazynek, 7 – sprężyna powrotna [87]

Kolejnym pistoletem działającym na zasadzie krótkiego odrzutu lufy był Mauser C96 (rys. 1.4) skonstruowany w 1893 roku. Broń ta charakteryzuje się ryglowaniem, które odbywa się za pomocą rygla wahliwego (1) posiadającego dwa występy współpracujące z dwoma wycięciami w zamku (2). Lufa (3) osadzona jest sztywno w suwadle (4) i porusza się razem z nim. W suwadle (4) umieszczony jest zamek (2), a w zamku (2) sprężyna powrotna (5). Zamek (2) odryglowywany jest w chwili, gdy tylny koniec rygla wahliwego (1) zostaje obniżony poprzez jego współpracę z wcięciem skośnym w szkielecie (6). Pistolet strzela przy użyciu naboju 7,63x25 mm Mauser. Niewymienny magazynek (7) znajduje się przed chwytem pistoletowym, ładowany jest łódką nabojową i mieści 10 nabojów. Broń ma kurkowy mechanizm uderzeniowy z kurkiem (8) odkrytym [86].



Rys. 1.4. 7,63 mm pistolet Mauser C96: a) zamek w przednim położeniu, b) zamek w tylnym położeniu, 1 – rygiel wahliwy, 2 – zamek, 3 – lufa, 4 – suwadło, 5 – sprężyna powrotna, 6 – szkielet, 7 – magazynek, 8 – kurek [88]

Pistolety Bergmann No. 5 M1897 (fot. 1.1), opatentowany w 1897 roku, wyróżnia się ryglowaniem lufy (1) poprzez przesunięcie zamka (2), przesuwany jest on w lewą stronę po przebyciu kilku milimetrów razem z lufą w trakcie odrzutu. Zasilany nabojem 7,65x25 mm Borchardt z jednorzędowego, wymiennego magazynka (3) o pojemności 10 nabojów, umieszczonego przed chwytem pistoletowym. Pistolet ma kurkowy mechanizm uderzeniowy z kurkiem (4) odkrytym [86].



Fot. 1.1. 7,65 mm pistolet Bergmann No. 5 M1897: 1 – lufa, 2 – zamek, 3 – magazynek, 4 – kurek [86]

Colt M1900 (rys. 1.5) działający również na zasadzie krótkiego odrzutu lufy, ryglowany za pomocą trzech występów ryglujących (1) wchodzących w wycięcia w zamku (2), odryglowywany poprzez obniżenie lufy (3). Został skonstruowany przez Johna Mosesa Browninga, opatentowany w 1897 roku. Zasilany nabojem .38 (9 mm). Broń ta wyróżnia się tym, że obniżenie lufy (3) realizowane jest za pomocą dwóch ogniw (4) zamocowanych na jej obu końcach. Późniejszymi modyfikacjami pistoletu są kolejno Colt M1905 oraz M1911 (rys. 1.6), oba na nabój .45 ACP. W M1911 po raz pierwszy zastosowano przekoszenie lufy, pozostawiając tylko jedno ogniwo (4) przy komorze nabojowej. Wszystkie te pistolety posiadają sprężynę powrotną (5) pod lufą (3) oraz mechanizm uderzeniowy kurkowy, z kurkiem odkrytym (6). Pojemność wymiennych pudełkowych jednorzędowych magazynków (7) wynoszą dla M1900 8 nabojów, a dla pozostałych po 7 nabojów [85, 89].



Rys. 1.5. .38 pistolet Colt M1900: a) zamek w przednim położeniu, b) zamek w tylnym położeniu, 1 – występy ryglujące, 2 – zamek, 3 – lufa, 4 – ogniwa prowadzące lufy, 5 – sprężyna powrotna, 6 – kurek, 7 – magazynek [89]



Rys. 1.6. .45 pistolet Colt M1911: a) zamek w przednim położeniu, b) zamek w tylnym położeniu, 1 – występy ryglujące, 2 – zamek, 3 – lufa, 4 – ogniwo prowadzące lufy, 5 – sprężyna powrotna, 6 – kurek, 7 – magazynek [90]

Roth-Steyr wz. 1907 (fot. 1.2), działa na zasadzie krótkiego odrzutu lufy. Ryglowanie zamka (1) następuje poprzez obrót lufy (2). Zasilany nabojem 8x19 mm Roth z jednorzędowego, niewymiennego magazynka znajdującego się w chwycie pistoletowym, o pojemności 10 nabojów. Broń wyposażono w igliczny mechanizm uderzeniowy [86].



Fot. 1.2. 8 mm Roth-Steyr wz. 1907: 1 – zamek, 2 – lufa, 3 – magazynek znajdujący się w chwycie [86]

Powyższe, wymienione konstrukcje, jako pierwsze wykorzystywały krótki odrzut lufy i zapoczątkowały różne sposoby ryglowania stosowane przy tej zasadzie działania. Obecnie wśród nowych konstrukcji najczęściej stosowane są rozwiązania gdzie proces ryglowania realizowany jest poprzez przekoszenie lufy w płaszczyźnie pionowej. Najczęściej lufa swoim tylnym występem rygluje się w oknie wyrzutowym zamka.

Reasumując zdecydowana większość pistoletów działa na zasadzie krótkiego odrzutu lufy ze względu na popularność amunicji o relatywnie dużej energii początkowej pocisku, dla słabszych i jednocześnie rzadziej używanych nabojów stosuje się zasadę działania opartą o zamek swobodny.

Przykładem nowoczesnej konstrukcji działającej na zasadzie krótkiego odrzutu lufy jest pistolet Sig Sauer P320 (fot. 1.3). Produkowany od 2014 roku. Zasilany nabojem 9x19 mm Parabellum. Ryglowanie następuje w płaszczyźnie pionowej poprzez przekoszenie lufy. Lufa (1) swoim tylnym występem rygluje się w oknie wyrzutowym zamka (2). Broń ma mechanizm uderzeniowy typu iglicznego. W wymiennych magazynkach (3) różnej wielkości, mieści się od 10 do 21 nabojów. Cechą charakterystyczną pistoletu P320 jest jego modułowa budowa pozwalająca na szybki demontaż wkładki wraz z mieszczącymi się w niej elementami mechanizmów wewnętrznych (głównie mechanizm spustowy). Pistolety dostępne są z trzema wielkościami szkieletów (4): full-size, carry oraz compact. W szybki sposób można wymienić szkielet na szkielet dowolnej wielkości przekładając wkładkę. Pistolet w 2017 roku został pistoletem Armii USA [91].



Fot. 1.3. 9 mm pistolet Sig Sauer P320 (wersja M17): 1 – lufa, 2 – zamek, 3 – magazynek 17 nabojowy, 4 – szkielet [91]

1.4. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest <u>opracowanie modelu numerycznego działania broni z krótkim odrzutem</u> <u>lufy</u> wykorzystującego metody: układów wieloczłonowych oraz elementów skończonych. Praca ta poszerzy stan wiedzy na temat broni działających na zasadzie krótkiego odrzutu lufy oraz umożliwi zastosowanie jej wyników w konstrukcji pistoletu PW INKA.

Po przeprowadzeniu walidacji na podstawie badań eksperymentalnych dla jednego wariantu konstrukcyjnego pistoletu, możliwe jest opracowanie wielowariantowego modelu numerycznego. Pozwala to na przeprowadzenie symulacji dla pistoletu PW INKA w różnych wariantach, bez potrzeby budowania dużej liczby kosztownych i czasochłonnych w realizacji modeli doświadczalnych.

W rozdziale drugim scharakteryzowano metodę układów wieloczłonowych. Opisano też założenia i warunki początkowo-brzegowe dla zbudowanego modelu oraz przedstawiono i omówiono wyniki badań symulacyjnych. Rozdział trzeci zawiera opis metody elementów skończonych. Posiada również opis zbudowanego modelu oraz wyniki symulacji w postaci charakterystyk kinematycznych oraz naprężeń występujących w konstrukcji. W rozdziale czwartym opisano użytą metodę badawczą i wyniki badań doświadczalnych. Rozdział piąty przedstawia walidację modeli numerycznych na podstawie badań eksperymentalnych. W rozdziale szóstym przedstawiono wybrane zagadnienia analizy parametrycznej dla zaprezentowanego modelu, oceniono wpływ takich parametrów jak: masa zamka, sztywność sprężyny powrotnej, droga odrzutu lufy, opory kurka, opory przerywacza, opory dosyłania naboju z magazynka do komory nabojowej, opór wyciągania i wyrzucania łuski, tarcie między częściami, opory przetłaczania pocisku przez lufę oraz ciśnienie gazów prochowych na charakterystyki kinematyczne rozważanego układu. Rozdział szósty zawiera ponadto opis

analizy parametrycznej, przeprowadzonej w celu sprawdzenia wpływu charakterystyk konstrukcyjnych na kinematykę broni. W rozdziale siódmym opisano historię opracowania pistoletu PW INKA, program badań, uzyskane wyniki oraz ideę działania automatyki broni. Przedstawiono za pomocą schematycznych rysunków etapy strzału. W ostatnim ósmym rozdziale podsumowano całość pracy.

1.5. Geneza pracy

Niniejsza rozprawa powstała w czasie prowadzenia prac badawczo-rozwojowych nad nowym pistoletem wojskowym, zasilanym nabojem 9x19 mm Parabellum. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla sprawdzenia konstrukcji pistoletu, tak aby możliwe było wdrożenie obliczeń teoretycznych do zastosowań praktycznych przy projektowaniu broni.

Prace wykonywane były w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia (WITU) w Zielonce i finansowane były ze środków własnych WITU. Rezultatem prac są modele oraz prototypy 9 mm pistoletu wojskowego INKA wykonane w Przedsiębiorstwie PREXER Sp. z o.o. w Łodzi.

Planowano, że PW INKA zastąpi w Wojsku Polskim pistolety P-64 i P-83 (zasilane wycofywanym nabojem 9x18 mm Makarowa) oraz pistolet WIST-94 obecnie już nieprodukowany, ale poddawany modernizacji i remontom, dostosowany do amunicji standardowej 9 mm NATO. Z tego powodu pistolet INKA powstał według wymagań programu operacyjnego pn. "Zaawansowane Indywidualne Systemy Walki kryptonim TYTAN". W 2017 roku został opracowany w ramach tego samego programu, przez Fabrykę Broni "Łucznik"-Radom Sp. z o.o. pistolet PR-15 RAGUN kalibru 9 mm (również na nabój Parabellum), który jest od 2019 roku dostarczany Wojskom Obrony Terytorialnej pod nową nazwą VIS 100. Służby mundurowe, w tym Wojsko Polskie, bądź inni odbiorcy, będą mieli, więc alternatywę w wyborze pistoletu polskiej produkcji przy okazji kolejnych zamówień.

2. ANALIZA DZIAŁANIA AUTOMATYKI BRONI Z UŻYCIEM METODY UKŁADÓW WIELOCZŁONOWYCH

Metoda układów wieloczłonowych (skrót MUW, ang. multi body analysis – MBA) obejmuje modelowanie, analizę i syntezę układów rzeczywistych traktowanych, jako układy wieloczłonowe (skrót UW, ang. multibody systems). Układ wieloczłonowy jest modelem abstrakcyjnym modelu rzeczywistego, przy założeniu, że elementy układu rzeczywistego można traktować, jako człony sztywne. Elementy te powiązane są ze sobą parami kinematycznymi różnych klas oraz działają na nie określone siły i momenty [92-94].

2.1. Budowa modelu numerycznego na potrzeby metody układów wieloczłonowych

Budowa modelu numerycznego rozpoczęła się od wykonania modeli 3D w programie CAD i wyeksportowania ich do uniwersalnego formatu Parasolid (.x_t). Tak przygotowane pliki zostały importowane do programu MSC Adams [95, 96].

Model numeryczny (rys 2.1) składa się z szesnastu części: zamka (1), szkieletu (2), lufy (3), wkładki (4), pudełka magazynka (5), donośnika (6), naboju (7), łuski (8), kurka (9), zaczepu kurka (10), żerdzi sprężyny kurka (11), osi sterującej (12), oś rozkładania (13), przerywacza (14), popychacza sprężyny szyny spustowej (15) oraz wyciągu (16). Model uwzględnia tylko te części, które mają istotny wpływ na pracę automatyki broni.

Oprócz sił oddziaływania między częściami broni, na układ działają następujące siły (rys. 2.1):

- F_p siła od ciśnienia gazów prochowych działająca na dno łuski,
- F_{sp} siła napięcia sprężyny mechanizmu powrotnego,
- F_{sk} siła napięcia sprężyny kurka,
- F_{sm} siła napięcia sprężyny magazynka,
- *F_{ss}* siła napięcia sprężyny szyny spustowej,
- F_{sw} siła napięcia sprężyny wyciągu,
- F_{pl} siła rozcalania pocisku z łuską,
- F_{wp} siła wcinania się pocisku w bruzdy przewodu lufy,
- F_{pl} siła przetłaczania pocisku przez przewód lufy.



- Rys. 2.1. Początkowe położenie części modelu numerycznego w chwili t = 0 oraz siły działające na układ automatyki pistoletu: 1 zamek, 2 szkielet, 3 lufa, 4 wkładka,
 - 5 pudełko magazynka, 6 donośnik, 7 nabój, 8 łuska, 9 kurek, 10 zaczep kurka,
- 11 żerdź sprężyny kurka, 12 oś sterująca, 13 oś rozkładania, 14 przerywacz, 15 popychacz sprężyny szyny spustowej, 16 wyciąg

Przyjęto następujące warunki początkowo brzegowe:

- części pistoletu (człony) w chwili początkowej t = 0 są nieruchome,
- zdefiniowano parametry materiałowe dla części,
- zdefiniowano siły działające na układ,
- w chwili początkowej t = 0 zaczyna narastać ciśnienie gazów prochowych, co jest równoważne zapłonowi prochu, siła od ciśnienia gazów prochowych jest wymuszeniem dla układu,
- wszystkie części, które są nieruchome w czasie strzału, w modelu zostały utwierdzone, czyli nie posiadają stopni swobody,
- nadano stopnie swobody członom, określając możliwość ich ruchu poprzez powiązanie parami kinematycznymi,
- zdefiniowano pary kontaktowe.

W rozpatrywanym przypadku jest pięć elementów broni, które nie posiadają stopni swobody, są nimi: szkielet (2), wkładka (4), pudełko magazynka (5), oś sterująca (12) oraz oś

rozkładania (13). Elementy z jednym stopniem swobody, z możliwością ruchu posuwisto zwrotnego to: zamek (1), donośnik (6), przerywacz (14) i popychacz sprężyny szyny spustowej (15). Części również o jednym stopniu swobody, ale z możliwością ruchu obrotowego to: kurek (9), zaczep kurka (10) i wyciąg (16). Dwa stopnie swobody z możliwością przesuwu i obrotu mają następujące elementy: lufa (3) oraz żerdź sprężyny kurka (11). Wszystkie sześć stopni swobody posiadają: nabój (7) i łuska (8).

Zdefiniowano 21 par kontaktowych występujących pomiędzy częściami, są nimi: zamek (1) – szkielet (2), zamek (1) – lufa (3), zamek (1) – nabój (7), zamek (1) – łuska (8), zamek (1) – kurek (9), zamek (1) – przerywacz (14), zamek (1) – wyciąg (16), lufa (3) – nabój (7), lufa (3) – łuska (8), lufa (3) – oś sterująca (12), lufa (3) – oś rozkładania (13), wkładka (4) – łuska (8), wkładka (4) – przerywacz (14), pudełko magazynka (5) – donośnik (6), pudełko magazynka (5) – nabój (7), pudełko magazynka (5) – łuska (8), donośnik (6) – nabój (7), nabój (7) – łuska (8), nabój (7) – wyciąg (16), łuska (8) – wyciąg (16) oraz przerywacz (14) – popychacz sprężyny szyny spustowej (15).

Siła od ciśnienia gazów prochowych (F_p), która jest wymuszeniem dla układu, została przyjęta na podstawie wyników pomiarów ciśnień panujących w lufie w trakcie strzału metodą eksperymentalną, przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym (rys. 2.2). Dzięki takiemu podejściu przyjęte wartości ciśnienia gazów prochowych są najbardziej wiarygodne. Badania te wykonano dla amunicji produkcji Mesko, również opisane dalej badania eksperymentalne charakterystyk kinematycznych broni przeprowadzono z użyciem tej amunicji. W programie Adams dyskretne dane pomiarowe zostały interpolowane za pomocą splajnu trzeciego stopnia (funkcji CUBSPL) [97].





Siła napięcia sprężyny mechanizmu powrotnego (F_{sp}) została ustalona na podstawie dokumentacji technicznej pistoletu (rys. 2.3) oraz pomiarów rzeczywistych, które potwierdziły zgodność sił przy zadanych ugięciach. Siły napięcia pozostałych sprężyn, czyli sprężyny kurka, magazynka, wyciągu i szyny spustowej, zostały zadane w programie tą samą metodą (tab. 2.1). Tłumienie sprężyn zostało pominięte.



Rys. 2.3. Rysunek wykonawczy sprężyny powrotnej z dokumentacji technicznej pistoletu INKA

Rodzaj sprężyny	Sztywność [N/mm]	Siła ugięcia wstępnego [N]
Sprężyna powrotna	1,024	23,0
Sprężyna kurka	3,7	46,6
Sprężyna magazynka	0,35	13
Sprężyna wyciągu	8,83	16,7

Tab. 2.1. Charakterystyki sprężyn pistoletu PW INKA

Siła rozcalania pocisku z łuską (F_{pl}), w rozprawie [1] nie jest rozpatrywana, gdyż zamek jest zaryglowany, a odryglowanie i ruch zespołu ruchomego następuje po ustaniu tej siły, wiec nie ma ona wpływu na pracę automatyki. Inaczej wygląda to w przypadku rozprawy [38], gdzie siła (F_{pl}) została uwzględniona, ponieważ występuje w chwili, gdy zamek razem z łuską zaczyna ruch wsteczny i tym samym hamuje ten układ. W niniejszych rozważaniach siła ta również przeciwdziała sile od ciśnienia gazów prochowych (F_p) podczas początkowej fazy ruchu układu zamek-lufa, dlatego zostanie uwzględniona.

Siła rozcalania pocisku z łuską (F_{pl}) dla naboju 9x19 mm, według normy [81] nie powinna być mniejsza niż 200 N. Według rozważań teoretycznych zawartych w pracy [38] siła ta (rys. 2.4) w chwili, gdy pocisk nie przemieszcza się względem łuski (występuje tarcie statyczne) wynosi ok. 600 N (F_0). Gdy zaczyna się wzajemny ruch tych dwóch elementów (tarcie dynamiczne), siła wynosi 200 N (F_{01}) i maleje liniowo do zera, do momentu całkowitego rozcalenia, czyli po przebyciu drogi równej głębokości wtłoczenia pocisku w łuskę ($l_{wtłocz}$), która równa jest 5,65 mm. Przyjęto na potrzeby niniejszej pracy ten właśnie model przebiegu siły rozcalania pocisku z łuską (F_{pt}).



Rys. 2.4. Przebieg jakościowy siły rozcalania pocisku z łuską (F_{pl}) w funkcji drogi pocisku: F_0 – siła statycznego oddziaływania pocisku z łuską, F_{01} – maksymalna siła dynamicznego oddziaływania pocisku z łuską, l_{wtlocz} – głębokość wtłoczenia pocisku w łuskę [38]

W pracach [1, 38] przy budowie modeli numerycznych układów automatyki broni, siły wcinania się pocisku w bruzdy lufy (F_{wp}) oraz przetłaczania pocisku przez przewód lufy (F_{pl}) zostały pominięte. Powodem tego jest fakt, iż w obu przypadkach przyjęto model broni z lufą nieruchomą, czyli lufą sztywno przymocowaną do komory zamkowej bez możliwości ruchu razem z zespołem odrzutowym. W niniejszej pracy siły te powinny zostać uwzględnione, gdyż w początkowej fazie działania automatyki pistoletu, lufa wykonuje ruch wsteczny razem z zamkiem i oba te elementy są ze sobą połączone (zaryglowane). Siły te działają w tym samym kierunku, lecz mają przeciwne zwroty, czyli przeciwdziałają sile od ciśnienia gazów prochowych (F_p), że w tym przypadku powinny zostać uwzględnione.

Siły wcinania się pocisku w bruzdy lufy (F_{wp}) oraz przetłaczania pocisku przez przewód lufy (F_{pl}) zostały przyjęte na podstawie rozprawy [38] (rys. 2.5), gdzie oszacowano je metodą elementów skończonych na potrzeby obliczeń balistyki wewnętrznej. Inne opracowania [64-78] dotyczące tej tematyki są mniej przydatne, gdyż nie zawierają wprost określonych sił oddziaływania pocisku z lufą w warunkach dynamicznych, jakie mają miejsce w trakcie strzału. Pomiar siły w warunkach quasi-statycznych jak w pracach [73, 76] nie ma w tym

przypadku zastosowania. Z kolei artykuł [75] przedstawia sumaryczną wartości energii potrzebnej do rozcalenia pocisku z łuską, wcięcia w bruzdy oraz przetłoczenia pocisku, a nie bezpośrednio potrzebne do tego siły, ale na potrzeby niniejszego opracowania obliczono siłę dzięki operacji różniczkowania (rys. 2.5). Rozprawa [39] zawiera wprost określone siły (F_{wp} , F_{pl}) ale dla naboju 9x18 mm Makarow. Siły obliczone na potrzeby prac [38, 75] różnią się w swoim przebiegu, ale popędy tych sił są bardzo zbliżone, co dowodzi, że oba te oszacowania są wiarygodne.



Rys. 2.5. Siła wcinania pocisku w bruzdy przewodu lufy wraz z siłą przetłaczania pocisku przez przewód lufy w funkcji czasu dla naboju 9x19 mm Parabellum [38, 75]

Siła oddziaływania łuski z komorą nabojową (F_{1k}) w rozprawach [38, 39] ma istotny wpływ, gdyż łuska przy zamku swobodnym zaczyna swój ruch w tym samym czasie, co pocisk, czyli podczas działania siły od ciśnienia gazów prochowych (F_p). Łuska podlega wtedy odkształceniom sprężystym ("rozpęczanie" łuski), co powoduje znaczny wzrost osiowej siły (tarcia) oddziaływania między łuską a komorą nabojową. W pracy [1] siła ta (F_{1k}) została pominięta, gdyż zamek z lufą odryglowują się po spadku ciśnienia do ciśnienia atmosferycznego lub bliskiego atmosferycznemu. Z tego samego powodu siła oddziaływania łuski z komorą nabojową (F_{1k}) w niniejszej rozprawie zostanie tylko odwzorowana, jako zwykłe tarcie pomiędzy łuską a lufą (model tarcia Coulomba), gdyż nie ma ono takiego charakteru jak w pracach [38, 39].

W modelu numerycznym występują siły kontaktu. Mogą być one reprezentowane przez funkcję Impact, Restitution lub funkcję zdefiniowaną przez użytkownika. W niniejszym

przypadku zastosowano funkcje IMPACT, która określa siłę kontaktową na podstawie następującego wyrażenia [98]:

$$F_{kon} = \begin{cases} 0 & dla \ q > q_0 \\ k_{kon}(q_0 - q)^e - c_{max} \dot{q} * STEP(q, q_0 - d, 1, q_0, 0) dla \ q \le q_0 \end{cases}$$
(2.1)

gdzie:

 F_{kon} – siła normalna kontaktowa, k_{kon} – sztywność kontaktowa, q_0 – droga, po której następuje kontakt członów, q – droga względna powierzchni kontaktowych,

e – wykładnik głębokości penetracji, c_{max} – współczynnik tłumienia wiskotycznego,

 \dot{q} – prędkość względna powierzchni kontaktowych, d – głębokość wzajemnej penetracji, przy której tłumienie jest równe c_{max} .

Parametry, jakie zostały zastosowane do opisu kontaktu między częściami w modelu numerycznym umieszczono w tabeli 2.2. Zastosowano takie same wartości parametrów dla kontaktów między parami elementów z różnych materiałów: stal-stal, stal-itamid, stal – mosiądz, mosiądz – mosiądz, stal – itamid, mosiądz – itamid. Ze stali wykonana jest większość części broni (zamek, lufa, wkładka, pudełko magazynka, kurek, zaczep kurka, żerdź sprężyny kurka, oś sterująca, oś rozkładania, przerywacz, popychacz sprężyny szyny spustowej, wyciąg), z Itamidu B-GF-35 szkielet i donośnik magazynka, łuska i płaszcz pocisku są mosiężne. Itamid B-GF-35 jest poliamidem PA6 z 35 procentową zawartością nieukierunkowanego włókna szklanego [99].

Tab. 2.2. Wartości parametrów funkcji kontaktu zastosowane w modelu numerycznym MUW [98]

1 5	5551
Parametr	Wartość
Sztywność kontaktowa k _{kon}	100 N/mm
Współczynnik tłumienia wiskotycznego cmax	10 N*s/m
Wykładnik głębokości penetracji e	2,2
Głębokość wzajemnej penetracji d	0,01 mm

Interpretacja graficzna wyrażenia (2.1) została zaprezentowana na rysunku 2.6.



Rys. 2.6. Z lewej – zależność siły wynikającej ze sztywności kontaktowej (F_k) od drogi (q) przy doborze różnych wykładników głębokości penetracji (e), z prawej – zależność współczynnik tłumienia wiskotycznego (c) od głębokości penetracji [98]

Tarcie w przedstawionych rozważaniach zostało odwzorowane na podstawie teorii Coulomba. Zgodnie z nią, tarcie dzieli się na spoczynkowe (statyczne) oraz poślizgowe (dynamiczne) (rys. 2.7). Tarcie statyczne (T_s), które zależne jest od współczynnika tarcia statycznego (μ_s) i siły nacisku (N), osiąga swoją maksymalną wartość tuż przed początkiem ruchu, narastając wraz ze wzrostem siły przesuwającej (P) [100]:

$$T_s = N\mu_s \tag{2.2}$$

Po rozpoczęciu ruchu, tarcie statyczne (T_s) przechodzi w dynamiczne (T_d) . Wraz ze wzrostem siły (*P*), czyli również prędkości względnej trących powierzchni, tarcie dynamiczne (T_d) , maleje do momentu osiągnięcia stałej wartości, zależy ono od współczynnika tarcia dynamicznego (μ_d) i siły nacisku (*N*) [100]:

$$T_d = N\mu_d \tag{2.3}$$



Rys. 2.7. Model tarcia według Coulomba [100]

Model Coulomba zastosowano w programie Adams (rys. 2.8). Współczynnik tarcia statycznego (μ_s) osiąga maksimum swojej wartości dla prędkości maksymalnego tarcia statycznego (V_s) lub minimum ($-\mu_s$) dla ujemnej wartości maksymalnego tarcia statycznego ($-V_s$). Tarcie statyczne, jakie istnieje w klasycznym modelu Coulomba ma miejsce przy prędkości $V_s = 0$, w tym przypadku tarcie przy zerowej prędkości nie występuje, gdyż było by to niemożliwe do odwzorowania w programie. Dodatnia wartość współczynnika tarcia dynamicznego (μ_d) jest osiągana dla prędkości większej lub równej granicznej prędkości tarcia dynamicznego ($V \ge V_d$), a ujemna ($-\mu_d$) dla prędkości mniejszej lub równej ujemnej granicznej prędkości tarcia dynamicznego ($V \le -V_d$). Użytkownik w programie wprowadza cztery parametry: μ_s , μ_d , V_s , V_d . Przebieg zależności współczynnika tarcia od prędkości interpolowany jest funkcją cubic step [98].



Slip Velocity

Rys. 2.8. Wykres współczynnika tarcia w funkcji względnej prędkości dwóch członów: μ_s – współczynnik tarcia statycznego, μ_d – współczynnik tarcia dynamicznego, V_s – prędkość maksymalnego tarcia statycznego, V_d – graniczna prędkość tarcia dynamicznego [98]

Dane materiałowe, dla wszystkich materiałów występujących w modelu numerycznym MUW przedstawiono w tabeli 2.3.

Parametr	Wartość
Gęstość stali	7850 kg/m^3
Gęstość mosiądzu	8545 kg/m ³
Gęstość Itamidu B-GF35	1410 kg/m^3
Współczynnik tarcia stal – stal statyczny/dynamiczny	0,15 / 0,08
Współczynnik tarcia stal – mosiądz statyczny/dynamiczny	0,11 / 0,06
Współczynnik tarcia mosiądz – mosiądz statyczny/dynamiczny	0,10 / 0,05
Współczynnik tarcia stal – itamid statyczny/dynamiczny	0,15 / 0,10
Współczynnik tarcia mosiądz – itamid statyczny/dynamiczny	0,12 / 0,08

Tab. 2.3. Dane materiałowe użyte przy budowie modelu numerycznego MUW [101-104]

2.2. Wyniki obliczeń metodą układów wieloczłonowych

Według pracy [38] krok czasowy, dzięki, któremu można uzyskać wyniki o zadawalającej dokładności wynosi 50 µs. W niniejszej rozprawie zastosowano krok o wartości 31,5 µs, zmniejszanie go skutkowało nieznacznymi zmianami w wynikach, więc uznano, że jest on zadawalający.

Wyniki obliczeń drogi zamka i lufy w funkcji czasu przedstawiono na rys. 2.9, prędkości rys. 2.10 oraz wszystkie zbiorczo 2.11. Prędkości zamka o wartościach dodatnich oznaczają jego prędkość w ruchu wstecznym, natomiast o wartościach ujemnych w ruchu powrotnym. Ruch zamka i lufy podzielono na dziewięć następujących okresów:

- **Okres 1:** Zaczyna się od początku zainicjowania strzału do momentu spadku ciśnienia w lufie do ciśnienia, które oddziałując na łuskę nie powoduje dalszego napędzania zamka, gdyż siła, jaką wywołuje staje się od tej pory mniejsza od sił oporu. W tym okresie następuje wzrost prędkości zamka do wartości maksymalnej.
- **Okres 2:** Od momentu osiągnięcia przez zamek prędkości maksymalnej do początku odryglowywania lufy. Prędkość zamka wraz z początkiem tego okresu zaczyna maleć.
- **Okres 3:** Od początku odryglowania do zatrzymania lufy, czyli spadku jej prędkości do zera. Na początku okresu lufa zaczyna być obniżana, na skutek jej współpracy z osią sterującą, co powoduje opór objawiający się spadkiem prędkości zamka oraz lufy.
- **Okres 4:** Od zatrzymania lufy do uderzenia dna łuski o wyrzutnik. Lufa zatrzymując się na osi sterującej odbija się od niej, co pokazują zmiany jej prędkości w pierwszej połowie tego okresu.
- **Okres 5:** Od chwili uderzenia dna łuski o wyrzutnik do momentu uderzenia zamka w szkielet, czyli osiągnięcia skrajnego tylnego położenia. Na początku okresu następuje nieznaczne skokowe zmniejszenie prędkości zamka, co jest skutkiem kontaktu łuski i wyrzutnika. Zamek poprzez uderzenie w szkielet wytraca pozostałą prędkość.
- **Okres 6:** Od uderzenia i odbicia się zamka do momentu uderzenia czółka w dno łuski naboju znajdującego się w magazynku. Prędkość zamka ma wartości ujemne, co oznacza, że wraca on w przednie położenie.
- **Okres 7:** Od uderzenia czółka w dno łuski naboju znajdującego się w magazynku do kontaktu zamka z lufą, gdzie następuje początek powtórnego ryglowania. W tym okresie zauważalne są uskoki prędkości zamka i lufy związane z oporami dosyłania naboju do komory nabojowej.
- **Okres 8:** Od uderzenia zamka w lufę do uderzenia lufy w oś rozkładania, która jest częścią ograniczającą dalszy ruch lufy i zamka do przodu. Na skutek uderzenia zamka w lufę następuje gwałtowny spadek prędkości zamka i przyrost prędkości lufy.
- **Okres 9:** Po uderzeniu lufy w oś rozkładania, lufa odbija się od niej, co pokazują fluktuacje prędkości oraz przemieszczenia w tym okresie. Zamek i lufa są zaryglowane i przemieszczają się razem.











MUW

3. ANALIZA DZIAŁANIA AUTOMATYKI BRONI Z UŻYCIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Metoda elementów skończonych (skrót MES, ang. finite element method – FEM) jest metodą aproksymacji, czyli otrzymania rozwiązań przybliżonych równań różniczkowych cząstkowych. Została ona obszernie opisana w literaturze [105-107].

Opracowano dwa modele numeryczne na potrzeby MES. Pierwszy bazowy, który nie uwzględnia sił oddziaływania między zamkiem a kurkiem, zamkiem a przerywaczem, sił oporu związanych z wyciąganiem i wyrzucaniem łuski oraz dosyłaniem kolejnego naboju do komory nabojowej. Drugi model został rozszerzony poprzez dodanie wyżej wymienionych sił, które zostały wyeksportowane z programu MSC Adams.

Pierwszy model zbudowano, aby pokazać możliwości zastosowania samej metody elementów skończonych, bez wykonywania dodatkowych obliczeń. Z kolei drugi, aby udowodnić, że istnieją możliwości uszczegółowiania modelu na potrzeby MES, ale z koniecznością obliczenia części sił w innym programie bądź określenia ich metodą analityczną.

W modelach przyjęto założenie, że zjawiska termiczne zostaną pominięte, ponieważ pistolet jest bronią samopowtarzalną, z możliwością prowadzenia tylko ognia pojedynczego oraz ze względu na jego jednostkę ognia. Zjawiska te mają większe znaczenie dla broni samoczynnych, przy prowadzeniu ognia ciągłego (seriami).

3.1. Budowa bazowego modelu numerycznego

Budowa modeli numerycznych na potrzeby MES rozpoczęła się od wykonania uproszczonych modeli 3D w programie CAD i wyeksportowania ich do uniwersalnego formatu STEP. Tak przygotowane pliki zostały importowane do programu ANSYS [108].

Uproszczenie modelu numerycznego polegające na redukcji ilości części oraz zmniejszeniu stopnia ich skomplikowania pozwoliło na skrócenie czasu obliczeń i uproszczenie procesu tworzenia siatki MES. Konieczność stosowania uproszczeń wynika z dużego zapotrzebowania na moc obliczeniową komputera przy metodzie elementów skończonych i tego typu zabieg był niezbędny, aby obliczenia były możliwe do przeprowadzenia.

Model numeryczny (rys 3.1) przygotowany na potrzeby MES, składa się z sześciu części: zamka (1), szkieletu (2), lufy (3), prowadnic (4), osi sterującej (5) oraz osi rozkładania (6). Model uwzględnia tylko kluczowe części z punktu widzenia działania automatyki broni. Szkielet został przyjęty, jako niewielki fragment, który współpracuje z zamkiem, gdy ten dochodzi w tylne położenie i w ten sposób ograniczany jest jego ruch wsteczny. Wkładka została uproszczona do samych prowadnic.

W układzie występują następujące siły zewnętrzne (rys. 3.1):

- F_p siła od ciśnienia gazów prochowych działająca na dno łuski,
- F_{pl} siła rozcalania pocisku z łuską,
- F_{wp} siła wcinania się pocisku w bruzdy przewodu lufy,
- F_{pl} siła przetłaczania pocisku przez przewód lufy,
- F_{sp} siła napięcia sprężyny mechanizmu powrotnego.



Rys. 3.1. Początkowe położenie części bazowego modelu numerycznego opracowanego na potrzeby MES w chwili t = 0 oraz siły działające na układ: 1 – zamek, 2 – szkielet, 3 – lufa, 4 – prowadnice, 5 – oś sterująca, 6 – oś rozkładania

Przyjęto takie same wartości wszystkich wymienionych powyżej sił jak do modelu stworzonego dla metody układów wieloczłonowych, co zostało opisane w podrozdziale 2.1. Sprężyna powrotna została odwzorowana jako element dyskretny. Tłumienie sprężyny zostało pominięte.

Przyjęto następujące warunki początkowo brzegowe analogicznie jak w przypadku MUW:

- części pistoletu w chwili początkowej t = 0 są nieruchome,
- zdefiniowano parametry materiałowe dla części,
- zdefiniowano siły działające na układ,
- w chwili początkowej *t* = 0 zaczyna narastać ciśnienie gazów prochowych (wymuszenie dla układu),
- wszystkie części, które są nieruchome w czasie strzału, w modelu zostały utwierdzone nieruchomo,
- zdefiniowano pary kontaktowe.

W rozpatrywanym przypadku są cztery części sztywno związane w przestrzeni (rys. 3.2), czyli: szkielet (2), oś sterująca (5), oś rozkładania (6) oraz prowadnice (4). Zdefiniowano 5 par kontaktowych występujących pomiędzy częściami, są nimi: zamek (1) – szkielet (2), zamek (1) – lufa (3), zamek (1) – prowadnice (4), lufa (3) – oś sterująca (5), lufa (3) – oś rozkładania (6).


Rys. 3.2. Model MES z oznaczonymi częściami sztywno związanymi w przestrzeni na fioletowo i strzałkami

Siła kontaktu między częściami ma dwie składowe, normalną opisaną wzorem (3.1) oraz styczną zdefiniowaną wyrażeniem (3.2) [108].

$$F_n = \begin{cases} 0 & jeśli \, u_n > 0\\ K_n u_n & jeśli \, u_n \le 0 \end{cases}$$
(3.1)

gdzie:

 F_n – kontaktowa siła normalna, K_n – sztywność kontaktowa w kierunku normalnym, u_n – względne przemieszczenie w kierunku normalnym w miejscu styku.

$$F_T = \begin{cases} K_T u_T & jeśli |F_T| - \mu F_n < 0 \ (spoczynek) \\ \mu K_n u_n & jeśli |F_T| - \mu F_n = 0 \ (poślizg) \end{cases}$$
(3.2)

gdzie:

 F_T – kontaktowa siła styczna, K_T – sztywność kontaktowa w kierunku stycznym, u_T – względne przemieszczenie w kierunku stycznym, μ – współczynnik tarcia.

Kontakt w rozpatrywanym przypadku został zdefiniowany poprzez funkcję kary opisaną wzorem (3.3). Wykrywany jest on metodą śledzenia trajektorii węzłów względem ścian (powierzchni) siatki innych elementów [108].

$$F_{ka} = 0.1 * \frac{M_N M_F}{M_N + M_F} * \frac{D}{\Delta t^2}$$
(3.3)

gdzie:

 F_{ka} – siła kontaktu w funkcji kary, M_N – masa efektywna węzła, M_F – masa efektywna powierzchni, D – głębokość penetracji, Δt – krok czasowy.

Kontakt może być również wykrywany metodą opartą na bliskości ścian, krawędzi i węzłów siatki, jest on wtedy zdefiniowany poniższym wzorem [108]:

$$F_{ka} = \frac{M_N M_F}{M_N + M_F} * \frac{D^2}{Gap * \Delta t}$$
(3.4)

gdzie:

Gap – szczeliny między ścianami, krawędziami i węzłami siatki elementów znajdujących się w kontakcie.

Tłumienie kontaktowe (Rayleigh'a) opisywane jest wzorem (3.5). Macierze masy [M] i sztywności [K] mnożone są przez stałe tłumienia Rayleigh'a (α_1 , α_2), określone wyrażeniami (3.6) oraz (3.7).

$$[C] = \alpha_1[M] + \alpha_2[K] \tag{3.5}$$

gdzie: [*C*] – macierz tłumienia.

$$\alpha_1 = 2\xi \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \tag{3.6}$$

gdzie:

 ξ – współczynnik tłumienia, ω_1 – początek zakresu częstotliwość, ω_2 – koniec zakresu częstotliwości.

$$\alpha_2 = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \tag{3.7}$$

Interpretację graficzną wzorów (3.6) i (3.7) przedstawia rysunek 3.3.



Rys. 3.3. Wykres zależności wartości współczynników Rayleigh'a (α_1, α_2) od współczynnika tłumienia (ξ) oraz częstotliwości (ω) [108]

Tarcie w programie Ansys odwzorowywane jest za pomocą modelu Coulomba, który to został już opisany w podrozdziale 2.1. Model Coulomba w programie opisany jest poniższym wzorem [108]:

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\beta v_{tp}} \tag{3.8}$$

gdzie:

 μ – współczynnik tarcia, μ_d – współczynnik tarcia dynamicznego, μ_s – współczynnik tarcia statycznego, β – współczynnik proporcjonalności, v_{tp} – wzajemna prędkość trących powierzchni.

Interpretację graficzną wzoru (3.8) została zaprezentowana na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Wykres zależności wartości współczynnika tarcia (μ) dla trących powierzchni od ich wzajemnej prędkości (v_{tp}) [108]

Współczynnik proporcjonalności określić można ze wzoru (3.9) [108], znając przynajmniej jedną wartość współczynnika tarcia (μ_1) dla odpowiadającej mu wzajemnej prędkości trących powierzchni (v_{tp1}).

$$\beta = -\frac{1}{\nu_{tp1}} \ln\left(\frac{\mu_1 - \mu_d}{\left(\frac{\mu_s}{\mu_d} - 1\right)\mu_d}\right)$$
(3.9)

Krok czasowy w obliczeniach typu explicit obliczany jest na podstawie poniższego wzoru:

$$\Delta t \le f * \left[\frac{h}{c}\right]_{min} \tag{3.10}$$

gdzie:

 Δt – krok czasowy, f – współczynnik bezpieczeństwa kroku czasowego, h – wymiar charakterystyczny elementu skończonego, c – prędkość dźwięku w materiale.

Indeks dolny we wzorze (3.10) "min" oznacza, że do wzoru podstawiany jest minimalny stosunek parametrów h do c, które to zależą odpowiednio od wielkości najmniejszego elementu skończonego oraz od materiału [108].

Do opisu materiału Itamid B-GF35 zastosowano związek konstytutywny Neo-Hookeana, który określa się wzorem (3.11) [108, 109]. Jest on używany przy sprężystym zachowaniu materiałów jednorodnych przy małych i umiarkowanych deformacjach [109].

$$\Psi = \frac{G}{2}(I_1 - 3) + \frac{1}{S}(J - 1)^2$$
(3.11)

gdzie:

 Ψ – funkcja energii odkształcenia, *G* – początkowy moduł sprężystości poprzecznej (Moduł Kirchhoffa), I_1 – niezmiennik tensora deformacji, *S* – parametr nieściśliwości, *J* – Jakobian.

Program Ansys oblicza parametry do wzoru (3.11) na podstawie danych np. ze statycznej próby rozciągania (rys. 3.5). Dane materiałowe użyte przy tworzeniu modelu MES dla Itamidu B-GF35 oraz stali zawarto w tabeli 3.1. Stal zamodelowano, jako sprężysty materiał liniowy.



Rys. 3.5. Wykres zależności naprężenia od odkształcenia z próby statycznego rozciągania dla materiału Itamid B-GF35 [103]

Rodzaj parametru	Wartość
Moduł Younga dla stali	200 GPa
Gęstość stali	7850 kg/m^3
Moduł Younga dla Itamidu	11500 MPa
Gęstość Itamidu	1410 kg/m^3

Tab. 3.1. Parametry materiałowe stali oraz Itamidu B-GF35 [101, 103]

3.2. Budowa rozszerzonego modelu numerycznego

Rozszerzony model numeryczny (rys. 3.6) składa się tak samo jak bazowy z sześciu części. Jego rozszerzenie polegało na imporcie do modelu sił z programu MSC Adams.

W układzie występują następujące siły zewnętrzne o takich samych wartościach jak w modelu bazowym (rys. 3.1):

- F_p siła od ciśnienia gazów prochowych działająca na dno łuski,
- F_{pl} siła rozcalania pocisku z łuską,
- F_{wp} siła wcinania się pocisku w bruzdy przewodu lufy,
- F_{pl} siła przetłaczania pocisku przez przewód lufy,
- F_{sp} siła napięcia sprężyny mechanizmu powrotnego.

Dodano następujące siły uzupełniające model:

- F_{ok} siła oddziaływania kurka na zamek (rys. 3.7),
- F_{dn} siła oporu dosyłania naboju do komory nabojowej,
- F_{wl} siła oporu wyciągania łuski z komory nabojowej,
- F_{op} siła oddziaływania przerywacza na zamek (rys. 3.7).



Rys. 3.6. Początkowe położenie części rozszerzonego modelu numerycznego opracowanego na potrzeby MES w chwili t = 0 oraz siły działające na układ: 1 - zamek, 2 - szkielet, 3 - lufa, 4 - wkładka, 5 - oś sterująca, 6 - oś rozkładania

Przykładowe dwie dodatkowe siły przedstawiono za pomocą wykresów (rys. 3.7). Są nimi składowe siły oddziaływania kurka na zamek oraz siły oddziaływania przerywacza na zamek wzdłuż osi OX (osie oznaczono na rys. 3.2).



Rys. 3.7. Wykres sił reakcji pomiędzy zamkiem a kurkiem oraz zamkiem a przerywaczem uzyskane na podstawie obliczeń MUW działających wzdłuż osi OX

3.3. Wyniki obliczeń kinematyki broni metodą elementów skończonych

Wyniki obliczeń metodą elementów skończonych drogi zamka i lufy w funkcji czasu przedstawiono na rysunku 3.8, a prędkości na rysunku 3.9.



Rys. 3.8. Przebieg drogi zamka i lufy w funkcji czasu dla modelu bazowego i rozszerzonego obliczona przy użyciu MES



Rys. 3.9. Przebieg prędkości zamka i lufy w funkcji czasu dla modelu bazowego i rozszerzonego obliczona przy użyciu MES

Analizę porównawczą dotyczącą wyników dla modelu bazowego i rozszerzonego zawarto w tabeli 3.2.

	$v_{wmax}[\frac{m}{s}]$	$t_w[ms]$	$v_p[\frac{m}{s}]$	$v_{pomax}[\frac{m}{s}]$	$t_{po}[ms]$
Model MES bazowy	7,26	10,46	4,13	3,69	24,74
Model MES rozszerzony	6,63	12,74	2,61	3,03	27,32
Różnica	-0,63	+2,28	-1,52	-0,66	+2,58
Rozbieżność względem modelu rozszerzonego [%]	-9,50	+17,90	-58,24	-21,78	+9,44

Tab. 3.2. Analiza wyników obliczeń kinematyki broni MES

gdzie:

 v_{wmax} – prędkość maksymalna zamka w ruchu wstecznym, t_w – czas ruchu wstecznego zamka, v_p – prędkość zamka pozostała przy zderzaku, v_{pomax} – prędkość maksymalna zamka w ruchu powrotnym, t_{po} – czas ruchu powrotnego zamka.

Ruch zamka i lufy dla modelu rozszerzonego (rys. 3.10) można podzielić na dziewięć okresów, dokładnie tak jak w przypadku wyników uzyskanych za pomocą metody układów wieloczłonowych. Opis okresów ruchu opisano w podrozdziale 2.2.



Rys. 3.10. Przebieg prędkości oraz drogi w funkcji czasu dla zamka i lufy obliczona przy użyciu MES z oznaczonymi okresami ruchu

3.4. Wyniki obliczeń naprężeń występujących w broni

Dzięki zastosowaniu metody elementów skończonych możliwe było nie tylko obliczenie charakterystyk kinematycznych, ale również naprężeń występujących w częściach broni. Na wykresach poniżej zawarto zmianę naprężeń zredukowanych według hipotezy wytężeniowej Hubera-Misesa-Hencky'ego (HMH) [108] dla trzech najbardziej obciążonych elementów: zamka (rys. 3.11), lufy (rys. 3.12), osi sterującej (rys. 3.13) oraz rozkłady naprężeń dla tych części. Obciążone są one wskutek wzajemnej współpracy, siła od ciśnienia gazów prochowych oddziałuje na zamek z pominięciem lufy. Na rysunkach 3.11–3.13 oznaczono okresy ruchu zamka i lufy opisane w podrozdziale 2.2 (zielone pionowe linie i cyfry).

Dla zamka (rys. 3.11) wybrano pięć najbardziej obciążonych obszarów i zaznaczono je znacznikami od 1 do 5, dla nich przedstawiono krzywe zmiany naprężeń w funkcji czasu. Dla lufy (rys. 3.12) oraz osi sterującej (rys. 3.13) przedstawiono naprężenia maksymalne występujące w obszarach oznaczonych strzałkami.



Naprężenia zredukowane HMH [MPa]



Naprężenia zredukowane HMH [MPa]



Rys. 3.12. Rozkład oraz przebieg naprężeń zredukowanych według hipotezy HMH w funkcji czasu w lufie dla obszaru występowania naprężeń maksymalnych z pominięciem obciążenia ciśnieniem gazów prochowych



Naprężenia zredukowane HMH [MPa]

Rys. 3.13. Rozkład oraz przebieg naprężeń zredukowanych według hipotezy HMH w funkcji czasu w osi sterującej dla obszaru występowania naprężeń maksymalnych

W zamku i lufie największe naprężenia występują w momencie, gdy zamek osiąga swoją największą prędkość i zaczyna się proces odryglowywania, a następnie, gdy zaczyna się proces ryglowania. W osi sterującej największe naprężenia są w chwili odryglowywania, natomiast w trakcie ryglowania przyrost naprężeń nie jest tak wyraźny.

Na potrzeby analizy lufa obciążona jest jedynie siłami związanymi ze współpracą części oraz siłami wcinania się pocisku w bruzdy i przetłaczania go przez przewód lufy, nie jest obciążona ciśnieniem gazów prochowych. Przedstawiono ją, aby pokazać, jakie naprężenia występują podczas jej ryglowania i odryglowywania.

Obszar największych naprężeń w zamku oznaczony, jako "1" znajduje się w miejscu podparcia sprężyny powrotnej o zamek. Kolejnym obszarem pod względem występowania dużych naprężeń jest "2" zlokalizowany w przedniej części zamka w miejscu wycięć prowadzących na prowadnicach wkładki. Obszary "3" i "4" znajdują się w miejscu przewężenia przekroju zamka na okno wyrzutowe łusek. Występowanie w tych miejscach wyższych naprężeń jest typowe i potrafi w wielu konstrukcjach powodować pękanie zmęczeniowe zamków. Obszar "5" odpowiada za współpracę z lufą w trakcie ryglowania i odryglowywania, więc podatny jest na występowanie wysokich naprężeń. Dlatego też w lufie maksymalne naprężenia mają miejsce w obszarze oznaczonym strzałką współpracującym z obszarem "5" zamka.

W osi sterującej maksymalne naprężenia występują na krawędzi sztywnego wiązania w przestrzeni, które to wiązanie odpowiada umieszczeniu (podparciu) osi w otworze wkładki szkieletu.

We wszystkich trzech zasadniczych częściach (zamek, lufa, oś sterująca) maksymalne wartości naprężeń są podobne, nie występują części bardzo i słabo obciążone. Sugeruje to, że części zostały skonstruowane właściwie pod względem wytrzymałościowym, nie występują nadmierne karby czy zwężenia przekrojów. Największe naprężenia dla zamka, lufy i osi sterującej wynoszą odpowiednio: 495, 428 oraz 431 MPa. Granica plastyczności dla stali, z której wykonano te części wynosi 780 MPa.

3.5. Analiza wrażliwości modeli MES na rozmiar elementów siatki

W celu oceny poprawności dobru rozmiaru elementów siatki MES, przeprowadzono analizę numeryczną dla modelu bazowego z siatką zagęszczoną, o zwiększonej ilości elementów skończonych o 231,4%. Porównanie wykonanej dyskretyzacji zawarto w tabeli 3.3. Rysunek 3.14 przedstawia model bazowy z podziałem na elementy skończone.

Rodzaj modelu	Liczba elementów skończonych	Liczba węzłów	Wielkość elementów skończonych [mm]	Liczba cykli obliczeniowych	Krok czasowy [ns]	Czas obliczeń
Model MES rozszerzony	42 609	57 555	0,088÷0,497	1 712 190	35,05	17 godz. 10 min. 15 s
	Porównanie r	nodelu bazo	owego oraz bazow	vego z siatką zagęs	zczoną	
Model MES bazowy	42 609	57 555	0,088÷0,497	1 712 061	35,05	18 godz. 16 min. 45 s
Model MES bazowy, siatka zagęszczona	141 218	175 291	0,062÷0,294	2 420 516	24,79	2 doby, 22 godz. 9 min. 57 s
Różnica bezwzględna	83 663	132 682	-0,026÷-0,203	708 455	-10,26	2 doby, 3 godz. 53 min. 12 s
Zmiana procentowa [%]	231,4	204,6	-29,5÷-40,8	41,4	-29,3	283,9

Tab. 3.3. Parametry dyskretyzacji przestrzennej oraz czasowej modeli



Rys. 3.14. Model MES z podziałem na elementy skończone

Do obliczeń użyto procesora Intel Xeon E5-1620V3, o 4-rdzeniach, 8-wątkach i taktowaniu 3,50 GHz. Współczynnik bezpieczeństwa kroku czasowego ustawiono na wartość 0,9. Krok czasowy dla modelu rozszerzonego nie uległ zmianie względem bazowego, ponieważ nie dokonano zmiany w wielkości elementów skończonych czy w materiałach.

Otrzymane wyniki prędkości i drogi zamka dla siatki pierwotnej oraz zagęszczonej przedstawiono na rysunku 3.15. Wyniki te wykazały niewielkie różnice, przy siatce zagęszczonej wzrasta czasochłonność obliczeń. Udowodniono, że zastosowany podział jest wystarczający dla prowadzonych analiz.



Rys. 3.15. Porównanie wyników prędkości oraz drogi zamka w funkcji czasu dla modelu bazowego oraz bazowego z siatką zagęszczoną

4. BADANIA EKSPERYMENTALNE BRONI, OKREŚLENIE CHARAKTERYSTYK KINEMATYCZNYCH

4.1. Opis zastosowanej metody badawczej oraz stanowiska pomiarowego

Badania eksperymentalne mają na celu określenie charakterystyk kinematycznych, we współczesnych technikach najczęściej poprzez pomiar przemieszczenia ruchomych elementów broni w funkcji czasu. Po przeprowadzeniu różniczkowania, obliczyć można ich prędkość oraz przyspieszenie.

Szczegółową analizę literaturową w dziedzinie metod pomiarowych stosowanych przy badaniach charakterystyk kinematycznych broni strzeleckiej przedstawiono w rozprawie [1]. Jej autor opisuje metody stosowane w przeszłości i obecnie, dzieli je na kontaktowe i bezkontaktowe. Klasyfikuje również urządzenia za pomocą, których przeprowadzane są pomiary, dzieląc je na: elektryczne, mechaniczne, mechaniczno-optyczne oraz optoelektroniczne. Skupia się głównie na opisie pomiarów przy użyciu szybkiej kamery, interferometru laserowego, czyli metody bezstykowe z aparaturą optoelektroniczną oraz przy użyciu przetwornika przyspieszenia, co jest metodą kontaktową z aparaturą elektryczną.

Współcześnie wykorzystuje się do badań kinematyki broni kamery szybkie jak w pracach [1, 38, 39, 110] oraz czujniki laserowe [22]. Na potrzeby pomiaru charakterystyk kinematyki broni stworzono dla Armii USA metodykę badań [111], gdzie dopuszcza się stosowanie dwóch rodzajów aparatur pomiarowych: kamer szybkich lub czujników laserowych.

Współczesna kamera szybka jest w stanie rejestrować do 2 100 000 klatek na sekundę [112]. W praktyce nie wykorzystuje się tak dużej częstotliwości, gdyż jest ona uzależniona od rozdzielczości, im większa ilość klatek tym mniejsza rozdzielczość. Po nagraniu filmu, jest on zazwyczaj przetwarzany za pomocą programu komputerowego, który jest w stanie określić przemieszczenie punktu charakterystycznego znajdującego się na poruszającym się obiekcie. Jeśli rozdzielczość filmu jest zbyt niska, to śledzenie punktu w programie jest kłopotliwe i obarczone dużymi błędami, dlatego w praktyce stosuje się dużo niższe ilości klatek rzędu od kilu tysięcy do kilkudziesięciu tysięcy. Aby można było śledzić punkt charakterystyczny, na badanym obiekcie umieszcza się najczęściej specjalny znacznik np. przyklejając papier z odpowiednim nadrukiem.

Czujniki laserowe są w stanie rejestrować pomiar z częstotliwością do ok. 50 kHz [113], czyli dużo mniejszą niż przy maksymalnych możliwościach kamery do zdjęć szybkich, ale z porównywalną częstotliwością, jaką wykorzystuje się w praktyce przy kamerach. Największą zaletą czujnika jest brak potrzeby przetwarzania danych, gdyż bezpośrednio otrzymywany jest wynik przemieszczenia w funkcji czasu, nie trzeba odczytywać go z filmu. Wadą czujnika laserowego jest fakt, iż potrzebne jest lustro przy czujniku interferencyjnym lub płaszczyzna przy czujniku triangulacyjnym umieszczona prostopadle do osi padania wiązki laserowej. Przy broni strzeleckiej może być to kłopotliwe, gdy zespół ruchomy umieszczony jest w komorze zamkowej lub nie ma on płaszczyzny prostopadłej do kierunku ruchu w swojej tylnej części.

Do przeprowadzenia badań na potrzeby niniejszej pracy użyto czujnika triangulacyjnego firmy Micro-Epsilon optoNCDT 2300-200 [113, 114]. Budowę tego czujnika ilustruje

rysunek 4.1a. Składa się on z detektora będącego układem wielu elementów światłoczułych wykonanych w technologii CMOS (od ang. complementary metal oxide semiconductor), optyki składającej się z układu soczewek oraz diody laserowej.

Pomiar wykorzystujący zjawisko triangulacji (rys. 4.1b) polega na tym, że na powierzchnię obiektu, dla którego mierzone jest przemieszczenie, pada wiązka światła laserowego o niewielkiej średnicy. Punkt świetlny znajdujący się na powierzchni, rejestrowany jest za pośrednictwem obiektywu przez detektor, który jest zlokalizowany w stałej i znanej odległości od lasera. Stały i znany jest również kąt między kierunkiem wiązki laserowej i osią optyczną obiektywu (φ) oraz powiększenie obiektywu (p_o). Detektor generuje sygnał zależny od położenia plamki świetlnej. Zmiana położenia powierzchni wzdłuż kierunku propagacji wiązki laserowej (Δz) powoduje zmianę położenia obrazu plamki świetlnej na powierzchni światłoczułej detektora (Δs). Zmianę położenia powierzchni (Δz) można opisać poniższym wzorem (4.1) [115, 116]:



Rys. 4.1. a) schemat budowy czujnika triangulacyjnego optoNCDT [113], b) schemat pomiaru zmiany położenia powierzchni metodą triangulacji laserowej [115]

Do najważniejszych parametrów użytego czujnika należą: maksymalna częstotliwość wynosząca 49,14 kHz oraz rozdzielczość 3 µm [114]. Takie parametry na potrzeby pomiaru kinematyki broni strzeleckiej są w zupełności wystarczające i dają lepsze wyniki od kamery do zdjęć szybkich. Jak wynika z badań broni strzeleckiej prowadzonych w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia, odczytowi drogi elementów ruchomych z filmu towarzyszy większy błąd niż przy pomiarze czujnikiem triangulacyjnym.

Stanowisko pomiarowe (fot. 4.1) składa się z broni (1) oraz czujnika triangulacyjnego (2) zamocowanych sztywno na statywie (3). Do zamka broni (1) przykręcono specjalną nakładkę (4), aby otrzymać odpowiednio dużą płaszczyznę prostopadłą do wiązki światła laserowego, niezbędną do uzyskania prawidłowych wyników. Dodatkowymi elementami są: zasilacz

i przetwornik czujnika, a także komputer do zapisu danych pomiarowych. Sztywne zamocowanie broni na stanowisku odzwierciedla warunki przyjęte do analiz numerycznych.



Fot. 4.1. Stanowisko do pomiaru przemieszczenia zamka w trakcie strzału: 1 – broń, 2 – czujnik triangulacyjny, 3 – statyw, 4 – nakładka

Do badań użyto zamka przystosowanego do montażu celownika kolimatorowego ze ścięciem w jego górnej części i dwoma gwintowanymi otworami. Zamiast celownika zamontowano nakładkę i przykręcono ją dwiema śrubami. Dzięki ścięciu trzon zamkowy jest lżejszy, ale po dodaniu nakładki i dwóch śrub jego masa jest taka sama jak w przypadku zamka zwykłego, czyli bez ścięcia na celownik kolimatorowy (tab. 4.1). Masa nakładki została dobrana celowo aby uzyskać zbieżność mas obu zamków.

Nazwa części:	Masa w eksperymencie [g]	Masa w obliczeniach [g]
Trzon zamkowy	296,10	318,16
Części ukompletowania zespołu zamka	21,94	21,94
Nakładka	20,82	-
Śruba mocująca nakładkę	$2 \ge 0.62 = 1.24$	-
Sumaryczna masa zamka kompletnego	340,10	340,10

Tab. 4.1. Masy zamków w eksperymencie i obliczeniach

W tabeli 4.1 częściami ukompletowania zamka są: wyciąg, oś wyciągu, sprężyna wyciągu, iglica, kołek iglicy, sprężyna iglicy, blokada iglicy, sprężyna blokady iglicy, muszka, wkręt muszki, szczerbinka, wkręt szczerbinki.

Po otrzymaniu wyników drogi w funkcji czasu (wyniki mają postać danych dyskretnych), w celu otrzymania prędkości należy przeprowadzić rachunek różniczkowania metodą numeryczną (wzór 4.2). Aby uzyskać przyspieszenie, różniczkowanie trzeba wykonać dwukrotnie. Dane dyskretne drogi oraz prędkości w funkcji czasu są interpolowane w celu uzyskania odpowiednich wykresów.

$$\nu_n = \frac{dx}{dt} = \frac{x_n - x_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \tag{4.2}$$

gdzie: v_n – prędkość w chwili pomiaru n, x – droga, t – czas, x_n – droga dla pomiaru n, x_{n-1} – droga dla pomiaru n-1 t_n – czas dla pomiaru n, t_{n-1} – czas dla pomiaru n-1.

4.2. Przedstawienie i analiza wyników

Badania wykonano dla amunicji dostarczonej od trzech producentów: Ruag, Mesko, Sellier & Bellot (S&B). Dane taktyczno-techniczne dla amunicji zawarto w tabeli 4.2.

			e
Producent amunicji	Ruag [117]	Mesko [118]	S&B [119]
Nazwa amunicji	NATO FMJ 8.0 g/124 gr	9 mm nabój pistoletowy wz. 1993 (nabój pistoletowy z pociskiem z rdzeniem ołowianym Parabellum 9x19)	9x19 FMJ V310492 124 grs
Maksymalne ciśnienie gazów prochowych [MPa]	285	245	-
Masa ładunku prochowego [g]	-	0,33	-
Masa pocisku [g]	8,0	$8,0\pm0,1$	8,0
Prędkość początkowa pocisku [m/s]	$V_0 = 395$	$V_{10} = 340 \div 360$	$V_0 = 360$
Energia początkowa pocisku [J]	$E_0 = 620$	$E_{10} = 490$	$E_0 = 518$
Długość lufy użytej przy pomiarach [mm]	200	-	150

Tab. 4.2. Dane taktyczno-techniczne dla amunicji użytej w badaniach broni wzorcowej

gdzie:

 V_0 – prędkość początkowa pocisku, V_{10} – prędkość pocisku na dystansie 10 m od wylotu lufy, E₀ – energia początkowa pocisku, E₁₀ – energia kinetyczna pocisku na dystansie 10 m od wylotu lufy.

Wykonano po dziesięć strzałów przy użyciu każdej z nich. Przebieg drogi zamka w funkcji czasu dla pięciu przykładowych strzałów dla nabojów Mesko zawarto na wykresie

poniżej (rys. 4.2). Przebiegi prędkości obliczone przy użyciu wzoru 4.2 umieszczono na kolejnym wykresie (rys. 4.3).





Rys. 4.3. Prędkość zamka w funkcji czasu amunicji produkcji Mesko dla pięciu przykładowych strzałów

Na podstawie dziesięciostrzałowych serii dla każdej z amunicji obliczono średnią wartość drogi (rys. 4.4) oraz średnią wartość prędkości (rys. 4.5). Analizę otrzymanych wyników zawarto w tabeli 4.3.



Rys. 4.4. Droga zamka w funkcji czasu będąca średnią z dziesięciu strzałów dla każdej z amunicji



Rys. 4.5. Prędkość zamka w funkcji czasu będąca średnią z dziesięciu strzałów dla każdej z amunicji

Rodzaj parametru \ Producent amunicji	Ruag	Mesko	S&B
$\bar{v}_{wmax}[\frac{m}{s}]$	7,50	6,44	6,75
$v_{wmax}MAX \left[\frac{m}{s}\right]$	7,68	6,83	7,08
$v_{wmax}MIN \left[\frac{m}{s}\right]$	7,41	6,32	6,67
$R_{v_{wmax}}\left[\frac{m}{s}\right]$	0,27	0,51	0,41
$S_{v_{wmax}}\left[\frac{m}{s}\right]$	0,11	0,21	0,16
$\bar{t}_w[ms]$	11,15	12,57	12,19
t _w MAX [ms]	11,21	12,78	12,33
t _w MIN [ms]	11,07	12,35	12,01
$R_{t_w} [ms]$	0,14	0,43	0,32
$s_{t_w} [ms]$	0,05	0,17	0,14
$\bar{v}_p[\frac{m}{s}]$	3,40	2,99	3,11
$v_p MAX \left[\frac{m}{s}\right]$	3,53	3,04	3,19
$v_p MIN \left[\frac{m}{s}\right]$	3,31	2,95	3,06
$R_{v_p}\left[\frac{m}{s}\right]$	0,22	0,09	0,13
$S_{v_p}\left[\frac{m}{s}\right]$	0,10	0,04	0,05
$\bar{v}_{pomax} \left[\frac{m}{s}\right]$	2,75	2,78	2,80
$v_{pomax}MAX \left[\frac{m}{s}\right]$	2,77	2,97	3,12
$v_{pomax}MIN \left[\frac{m}{s}\right]$	2,73	2,71	2,68
$R_{v_{pomax}}\left[\frac{m}{s}\right]$	0,04	0,26	0,44
$S_{v_{pomax}}\left[\frac{m}{s}\right]$	0,01	0,11	0,16
$\bar{t}_{po}[ms]$	28,04	27,43	27,19
t _{po} MAX [ms]	28,27	27,45	27,62
t _{po} MIN [ms]	26,74	27,21	26,99
$R_{t_{po}} [ms]$	1,53	0,24	0,63
$s_{t_{po}} [ms]$	0,73	0,11	0,25

Tab. 4.3. Analiza wyników będących średnią dziesięciostrzałowej serii dla każdej amunicji

gdzie:

 \bar{v}_{wmax} – średnia arytmetyczna prędkości maksymalnych zamka w ruchu wstecznym, v_{wmax}MAX – najwyższa wartość prędkości maksymalnej zamka w ruchu wstecznym, $v_{wmax}MIN$ – najniższa wartość prędkości maksymalnej zamka w ruchu wstecznym, $R_{v_{wmax}}$ – rozstęp prędkości maksymalnych zamka w ruchu wstecznym, $s_{v_{wmax}}$ – odchylenie standardowe prędkości maksymalnej zamka w ruchu wstecznym, \bar{t}_w – średnia arytmetyczna czasów ruchu wstecznego zamka, t_wMAX – najwyższa wartość czasu ruchu wstecznego zamka, t_wMIN – najniższa wartość czasu ruchu wstecznego zamka, R_{t_w} – rozstęp czasów ruchu wstecznego zamka, s_{t_w} – odchylenie standardowe czasu ruchu wstecznego zamka, \bar{v}_p – średnia arytmetyczna prędkości zamka pozostałej przy zderzaku, v_nMAX – najwyższa wartość prędkości zamka pozostałej przy zderzaku, v_pMIN – najniższa wartość prędkości zamka pozostałej przy zderzaku, R_{v_n} – rozstęp prędkości zamka pozostałej przy zderzaku, s_{v_n} – odchylenie standardowe prędkości zamka pozostałej przy zderzaku, \bar{v}_{pomax} – średnia arytmetyczna prędkości maksymalnych zamka w ruchu powrotnym, v_{pomax}MAX – najwyższa wartość prędkości maksymalnej zamka w ruchu powrotnym, v_{pomax}MIN – najniższa wartość prędkości maksymalnej zamka w ruchu powrotnym, R_{vpomax} – rozstęp prędkości maksymalnych zamka w ruchu powrotnym, $s_{v_{pomax}}$ – odchylenie standardowe prędkości maksymalnej zamka w ruchu powrotnym, \bar{t}_{po} – średnia arytmetyczna czasów ruchu powrotnego zamka, t_{po}MAX – najwyższa wartość czasu ruchu powrotnego zamka, t_{po}MIN – najniższa wartość czasu ruchu powrotnego zamka, $R_{t_{no}}$ – rozstęp czasów ruchu powrotnego zamka, $s_{t_{po}}$ – odchylenie standardowe czasu ruchu powrotnego zamka.

Rozstęp, informujący o zakresie, w jakim znajdują się wyniki pomiarów obliczono z poniższego wzoru [120]:

$$R = a_{max} - a_{min} \tag{4.3}$$

gdzie:

R – rozstęp, a_{max} – najwyższa wartość pomiaru w zbiorze wyników, a_{min} – najniższa wartość pomiaru w zbiorze wyników.

Odchylenie standardowe z próby, będące średnim odchyleniem wartości cechy od średniej arytmetycznej obliczono ze wzoru [120]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (a_i - \bar{a})^2}{n - 1}}$$
(4.4)

gdzie:

s – odchylenie standardowe z próby, a_i – wartość i-tego pomiaru, \overline{a} – średnia arytmetyczna, n – liczba pomiarów.

Przy strzałach z amunicji Ruag prędkość maksymalna zamka w ruchu wstecznym (v_{wmax}) i prędkość zamka pozostała przy zderzaku (v_p) jest największa, a czas ruchu wstecznego zamka (t_w) najmniejszy. Dzieje się tak ze względu na największe ciśnienie gazów prochowych w porównaniu z nabojami pozostałych producentów, co dowodzą dane z tabeli 4.2. Niestety producent amunicji S&B nie podaje wartości maksymalnej ciśnienia gazów prochowych, ale na podstawie energii kinetycznej czy prędkości pocisków można wywnioskować, że ciśnienie ma wartość pośrednią pomiędzy ciśnieniami amunicji Ruag i Mesko. Ma to swoje odzwierciedlenie w prędkościach (v_{wmax}, v_p) i czasie (t_w), które to parametry również stanowią wartości pośrednie pomiędzy amunicjami dwóch pozostałych producentów.

5. WALIDACJA MODELI TEORETYCZNYCH

5.1. Walidacja modelu MUW

Zestawienie wyników pomiarów z badań eksperymentalnych oraz wyniki obliczeń metodą układów wieloczłonowych zaprezentowano za pomocą wykresów drogi zamka w funkcji czasu (rys. 5.1) i prędkości zamka w funkcji czasu (rys. 5.2).



Rys. 5.1. Droga zamka w funkcji czasu, zmierzona eksperymentalnie oraz obliczona metodą układów wieloczłonowych



Rys. 5.2. Prędkość zamka w funkcji czasu, zmierzona eksperymentalnie oraz obliczona metodą układów wieloczłonowych

Do walidacji użyto średniej arytmetycznej z dziesięciu pomiarów eksperymentalnych dla amunicji Mesko, ponieważ jak wcześniej już pisano, do obliczeń numerycznych przyjęto ciśnienia dla tej amunicji.

Porównując wykresy, zauważalne jest podobieństwo jakościowe i ilościowe między prędkościami oraz drogami uzyskanymi na drodze eksperymentu i obliczeń. W tabeli 5.1 zawarto analizę dotyczącą walidacji modelu numerycznego dla metody układów wieloczłonowych.

	$v_{wmax}[\frac{m}{s}]$	$t_w[ms]$	$v_p[\frac{m}{s}]$	$v_{pomax}[\frac{m}{s}]$	$t_{po}[ms]$
Obliczenia MUW	6,45	11,90	2,99	2,71	28,40
Eksperyment	6,44	12,57	2,99	2,78	27,43
Różnica	+0,01	-0,67	0,00	-0,07	+0,97
Rozbieżność względem eksperymentu [%]	+0,16	-5,33	0,00	-2,52	+3,54

Tab. 5.1. Analiza wyników eksperymentu i obliczeń MUW

gdzie:

– kolorem zielonym oznaczono wartości mieszczące się w odchyleniu standardowym eksperymentu,

– kolorem pomarańczowym oznaczono wartości niemieszczące się w rozstępie eksperymentu, ale wystarczające do zastosowań inżynierskich.

Różnica prędkości maksymalnej w ruchu wstecznym (v_{wmax}) oraz prędkości maksymalnej w ruchu powrotnym (v_{pomax}) wynosi odpowiednio $0,01 \frac{m}{s}$ i $0,07 \frac{m}{s}$. Wartości te mieszczą się w odchyleniu standardowym dla serii pomiarów w eksperymencie. W ujęciu procentowym różnice wynoszą 0,16% i 2,52%. Różnica czasu ruchu wstecznego zamka (t_w) oraz czasu ruchu powrotnego zamka (t_{po}) względem eksperymentu wynosi odpowiednio 0,67 ms (5,33%) i 0,97 ms (3,54%), co jest zadowalającym wynikiem w zastosowaniach inżynierskich, mimo że wyniki nie mieszczą się w rozstępie eksperymentu. Z kolei dla prędkości zamka przy zderzaku (v_p) różnica wynosi 0,00 $\frac{m}{s}$ (0,00%).

Podsumowując przeprowadzona walidacja udowodniła, że model numeryczny rozwiązany MUW prezentuje zadawalające wyniki na potrzeby prowadzenia prac konstrukcyjnych. Odwzorowano tarcie między częściami broni, siłę rozcalania pocisku z łuską, siłę wcinania się pocisku w bruzdy przewodu lufy, siłę przetłaczania pocisku przez przewód lufy, siły oddziaływania sprężyn, siły występujące podczas ekstrakcji łuski, dosyłania naboju do komory nabojowej, oddziaływanie między częściami itd. Opracowany model numeryczny jest rozbudowany i z dużą dokładnością odzwierciedla broń wzorcową. Rozbieżności między

wynikami badań eksperymentalnych oraz obliczeń wynikają z niedoskonałości przyjętej metody modelowania numerycznego, która to metoda zakłada, że części są traktowane, jako bryły sztywne, z błędów pomiarowych w trakcie eksperymentu dotyczącego pomiaru prędkości zamka broni oraz eksperymentalnego pomiaru ciśnienia gazów prochowych.

5.2. Walidacja modelu MES

Do walidacji wyników obliczeń użyto modelu MES rozszerzonego o siły związane z pracą kurka, przerywacza, wyciąganiem łuski oraz dosyłaniem kolejnego naboju do komory nabojowej. Model ten dokładniej odwzorowuje rzeczywisty układ, dla którego wykonano badania eksperymentalne.

Zestawienie wyników pomiarów z badań eksperymentalnych oraz wyniki obliczeń metodą elementów skończonych przedstawiono na wykresach drogi zamka w funkcji czasu (rys. 5.3) i prędkości zamka w funkcji czasu (rys. 5.4).



Rys. 5.3. Droga zamka w funkcji czasu, zmierzona eksperymentalnie oraz obliczona metodą elementów skończonych



Rys. 5.4. Prędkość zamka w funkcji czasu, zmierzona eksperymentalnie oraz obliczona metodą elementów skończonych

Porównując wykresy prędkości oraz drogi uzyskane za pomocą eksperymentu oraz obliczeń zauważalne jest podobieństwo jakościowe i ilościowe. W tabeli 5.2 zawarto analizę dotyczącą walidacji modelu numerycznego dla metody elementów skończonych.

	$v_{wmax}[\frac{m}{s}]$	$t_w[ms]$	$v_p[\frac{m}{s}]$	$v_{pomax}[\frac{m}{s}]$	$t_{po}[ms]$
Obliczenia MES	6,63	12,74	2,61	3,03	27,32
Eksperyment	6,44	12,57	2,99	2,78	27,43
Różnica	+0,19	+0,17	-0,38	+0,25	-0,11
Rozbieżność względem eksperymentu [%]	+2,95	+1,35	-12,71	+8,99	-0,40

Tab. 5.2. Analiza wyników eksperymentu i obliczeń MES

gdzie:

– kolorem zielonym oznaczono wartości mieszczące się w odchyleniu standardowym eksperymentu,

– kolorem pomarańczowym wartości niemieszczące się w rozstępie eksperymentu, ale wystarczające do zastosowań inżynierskich.

Różnica prędkości maksymalnej w ruchu wstecznym (v_{wmax}) wynosi 0,19 $\frac{m}{s}$, czyli 2,95% i mieści się w odchyleniu standardowym dla eksperymentu. Różnica czasu ruchu wstecznego zamka (t_w) oraz czasu ruchu powrotnego (t_{po}) względem eksperymentu wynosi odpowiednio 0,17 ms oraz 0,11 ms, w procentach 1,35% oraz 0,40% i mieści się w rozstępie eksperymentu. Z kolei dla prędkości zamka przy zderzaku (v_p) różnica wynosi 0,38 $\frac{m}{s}$ (12,71%), a w ruchu powrotnym (v_{pomax}) 0,25 $\frac{m}{s}$ (8,99%), tu różnice są większe, ale nadal wystarczające, mimo że nie mieszczą się w rozstępie eksperymentu.

Podsumowując przeprowadzona walidacja udowodniła, że model numeryczny rozwiązany przy użyciu MES prezentuje zadawalające wyniki na potrzeby prowadzenia prac konstrukcyjnych. Model jest dokładny gdyż odwzorowuje: siłę rozcalania pocisku z łuską, siłę wcinania się pocisku w bruzdy przewodu lufy, siłę przetłaczania pocisku przez przewód lufy, tarcie między częściami broni. Dodatkowo dzięki wyeksportowaniu z programu MSC Adams i importowaniu ich do programu ANSYS model zawiera: siły oddziaływania kurka, przerywacza, siły występujące podczas ekstrakcji łuski i dosyłania naboju do komory nabojowej. Opracowany model numeryczny z dużą dokładnością odzwierciedla broń wzorcową. Rozbieżności między wynikami badań eksperymentalnych oraz obliczeń wynikają z przyjętych uproszczeń (uproszczenia brył części broni, sztywne utwierdzenie niektórych z nich), z błędów pomiarowych w trakcie eksperymentu dotyczącego pomiaru prędkości zamka broni oraz eksperymentalnego pomiaru ciśnienia gazów prochowych.

6. ANALIZA PARAMETRYCZNA WPŁYWU WYBRANYCH CHARAKTERYSTYK KONSTRUKCYJNYCH NA KINEMATYKĘ BRONI

Najistotniejszymi parametrami konstrukcyjnymi broni działającej na zasadzie krótkiego odrzutu lufy wpływającymi na charakterystyki kinematyczne są:

- masa zamka,
- sztywność sprężyny powrotnej,
- droga odrzutu lufy,
- opory pracy mechanizmów tj. kurek oraz przerywacz,
- opory związane z dosłaniem kolejnego naboju z magazynka do komory nabojowej oraz wyciągania i wyrzucenia łuski po strzale,
- siły tarcia, które uzależnione są od konstrukcji, dobranych materiałów, chropowatości współpracujących powierzchni, nasmarowania itp.
- opory rozcalania pocisku z łuską, wcinania się płaszcza pocisku w bruzdy lufy oraz przetłaczania pocisku przez lufę,
- ciśnienie gazów prochowych stosowanej amunicji.

Obliczenia wpływu tych parametrów na pracę automatyki zostaną przeprowadzone za pomocą MUW, podobnie jak w rozdziale drugim. Obliczenia przy tak złożonych modelach numerycznych przy użyciu MES były by bardzo czasochłonne lub nawet niemożliwe do przeprowadzenia.

Wpływ masy zespołu odrzutowego na pracę automatyki broni dla karabinka działającego na zasadzie odprowadzania gazów prochowych przez boczny otwór w lufie przeanalizowano w pracach [1, 7], również metodą układów wieloczłonowych. Z kolei wpływ parametrów sprężyny powrotnej w artykułach [8, 17], gdzie w [8] za pomocą MUW, w [17] przy użyciu metody analitycznej.

6.1. Wpływ masy zamka na charakterystyki kinematyczne

Obliczenia prędkości (rys. 6.1, 6.3) i przemieszczenia (rys. 6.2, 6.4) zamka w funkcji czasu przeprowadzono dla dwunastu wariantów jego mas: mniejsza o 55%, 30%, 20%, 15%, 10% i 5%, większa o 5%, 10%, 15%, 20%, 70% i 137% od nominalnej oraz porównano wyniki z wynikiem dla nominalnej masy zamka. Wartości mas zamków przyjętych do obliczeń zawarto w tabeli 6.1. Na masę zamka składają się wszystkie części wchodzące w jego ukompletowanie (sumaryczna masa części biorących udział w odrzucie), dla broni wzorcowej są to: trzon zamkowy, wyciąg, oś wyciągu, sprężyna wyciągu, iglica, kołek iglicy, sprężyna iglicy, blokada iglicy, sprężyna blokady iglicy, muszka, wkręt muszki, szczerbinka, wkręt szczerbinki.

Zmiana masy zamka w stosunku do masy nominalnej	Masa zamka [g]
-55%	153,05
-30%	238,07
-20%	272,08
-15%	289,09
-10%	306,09
-5%	323,10
0% (nominalna)	340,10
+5%	357,11
+10%	374,11
+15%	391,12
+20%	408,12
+70%	578,17
+137%	806,04

Tab. 6.1. Masy zamków przyjęte do obliczeń



Rys. 6.1. Prędkość zamka w funkcji czasu dla jego masy nominalnej, mniejszej o 55%, 20% i 10% oraz większej o 10%, 20% i 137%



Rys. 6.2. Droga zamka w funkcji czasu dla jego masy nominalnej, mniejszej o 55%, 20% i 10% oraz większej o 10%, 20% i 137%



Rys. 6.3. Prędkość zamka w funkcji czasu dla jego masy nominalnej, mniejszej o 30%, 15% i 5% oraz większej o 5%, 15% i 70%



Rys. 6.4. Droga zamka w funkcji czasu dla jego masy nominalnej, mniejszej o 30%, 15% i 5% oraz większej o 5%, 15% i 70%

Zmiana masy zamka ma znaczący wpływ na jego maksymalną prędkość w ruchu wstecznym (v_{wmax}). Przy najmniejszej masie prędkość ta wynosi 10,18 $\frac{m}{s}$, a przy największej 3,30 $\frac{m}{s}$, czyli odpowiednio więcej o 3,73 $\frac{m}{s}$ (57,83%) i mniej o 3,15 $\frac{m}{s}$ (48,84%) od wartości nominalnej. Czas ruchu w tylne położenie (t_w) wynosi wtedy odpowiednio 5,9 ms oraz 32,6 ms, czyli mniej o 6,0 ms (50,42%) oraz więcej o 20,7 ms (173,95%).

Mniejsza masa skutkuje też większą prędkością pozostałą przy zderzaku (v_p) , gdzie maksymalnie wynosi ona 7,46 $\frac{m}{s}$, czyli więcej o 4,47 $\frac{m}{s}$, w procentach o 149,5%. Przy masie zamka większej o 137%, prędkość pozostała zamka przy zderzaku (v_p) wynosi 0,00 $\frac{m}{s}$, a zamek dochodzi do zderzaka. Jest to wartość graniczna i dlatego została zaprezentowana, po jej przekroczeniu zamek nie dochodzi do skrajnego tylnego położenia, co powinno mieć miejsce dla niezawodności działania broni.

Wraz ze wzrostem masy wydłuża się również powrót zamka (t_{po}) w przednie położenie i wynosi on od 22,9 ms do 39,1 ms, czyli mniej o 5,5 ms (19,37%) oraz więcej o 10,7 ms (37,68%). Lżejsze zamki powinny osiągać większe prędkości maksymalne w ruchu powrotnym (v_{pomax}), czego nie potwierdzają jednoznacznie dane z tabeli 6.2 w której zawarto dokładną analizę dotyczącą wyników obliczeń. Zwłaszcza zauważalne jest to na przykładzie z zamkiem cięższym o 5% gdzie prędkość ta zamiast maleć, rośnie o 1,85%. Dzieje się tak mino, że zamki lżejsze osiągają większe przyspieszenia w początkowym okresie ruchu powrotnego, ale są mocniej hamowane przez opory związane z dosyłaniem kolejnego naboju do komory nabojowej. Gdyby tych oporów nie było, to ta zależność, czyli mniejsza masa zamka to większa prędkość powrotu zostałaby zachowana.

Zmiana masy zamka w stosunku do masy nominalnej [%]	$v_{wmax}[\frac{m}{s}]$	Δν _{wmax} [%]	$t_w[ms]$	$\Delta t_w[\%]$	$\nu_p[\frac{m}{s}]$	$\Delta v_p[\%]$	$v_{pomax}[rac{m}{s}]$	$\Delta v_{pomax}[\%]$	$t_{po}[ms]$	$\Delta t_{po}[\%]$
-55	10,18	+57,83	5,9	-50,42	7,46	+149,50	3,43	+26,57	22,9	-19,37
-30	8,14	+26,20	9,3	-21,85	3,96	+32,44	2,96	+9,23	25,2	-11,27
-20	7,50	+16,28	10,1	-15,13	3,69	+23,41	2,75	+1,48	26,9	-5,28
-15	7,21	+11,78	10,5	-11,76	3,49	+16,72	2,78	+2,58	27,2	-4,23
-10	6,94	+7,60	11,0	-7,56	3,26	+9,03	2,78	+2,58	27,4	-3,52
-5	6,68	+3,57	11,2	-5,88	3,20	+7,02	2,72	+0,37	28,0	-1,41
0	6,45	0,00	11,9	0,00	2,99	0,00	2,71	0,00	28,4	0,00
+5	6,23	-3,41	12,2	+2,52	2,83	-5,35	2,76	+1,85	28,6	+0,70
+10	6,03	-6,51	12,7	+6,72	2,69	-10,03	2,71	0,00	29,1	+2,46
+15	5,83	-9,61	13,0	+9,24	2,63	-12,04	2,69	-0,74	29,5	+3,87
+20	5,65	-12,40	13,5	+13,45	2,50	-16,39	2,67	-1,48	30,0	+5,63
+70	4,33	-32,87	19,2	+61,34	1,39	-53,51	2,38	-12,18	34,1	+20,07
+137	3,30	-48,84	32,6	+173,95	0,00	-100,00	2,03	-25,09	39,1	+37,68

Tab. 6.2. Analiza wyników obliczeń dla różnych mas zamków

gdzie:

 v_{wmax} – prędkość maksymalna zamka w ruchu wstecznym, Δv_{wmax} – zmiana prędkości maksymalnej zamka w ruchu wstecznym w stosunku do prędkości nominalnej, t_w – czas ruchu wstecznego zamka, Δt_w – zmiana czasu ruchu wstecznego zamka w stosunku do czasu nominalnego, v_p – prędkość zamka pozostała przy zderzaku, Δv_p – zmiana prędkości pozostałej zamka przy zderzaku w stosunku do prędkości nominalnej, v_{pomax} – prędkość maksymalna zamka w ruchu powrotnym, Δv_{pomax} – zmiana prędkości maksymalnej zamka w ruchu powrotnym w stosunku do prędkości nominalnej, t_{po} – czas ruchu powrotnego zamka, Δt_{po} – zmiana czasu ruchu powrotnego zamka w stosunku do czasu nominalnego. Podsumowując, im mniejsza masa zamka, tym większe prędkości osiąga on w ruchu wstecznym jak i powrotnym, skraca się również czas jego ruchu wstecznego i powrotnego.

Dowiedziono, że masa zamka na etapie projektowania broni została dobrana poprawnie. Prędkość pozostała przy zderzaku (v_p) wynosząca 2,99 $\frac{m}{s}$ dowodzi, że zamek posiada nadmiar energii, który niezbędny jest, aby zapewnić niezawodność działania broni w trudnych warunkach środowiskowych jak np. zapylenie.

Dowiedziono również, że możliwy jest montaż celownika kolimatorowego na zamku broni, co podnosi masę całego zespołu o maksymalnie ok. 70 g (waga kolimatorów przeznaczonych do pistoletów) [121]. Udowadnia to wariant obliczeniowy +20% masy zamka, gdzie masa zespołu zamka rośnie z nominalnej 340,1 g do 408,12 g i nadal dysponuje on nadmiarem energii, czyli prędkość pozostała przy zderzaku (v_p) jest większa od zera.

6.2. Wpływ sprężyny powrotnej na charakterystyki kinematyczne

Obliczenia prędkości (rys. 6.5, 6.7) i drogi (rys. 6.6, 6.8) zamka w funkcji czasu przeprowadzono dla dwunastu wariantów sprężyn powrotnych o sztywności mniejszej o 60%, 40%, 20%, 15%, 10% i 5%, większej o 5%, 10%, 15%, 20%, 40% i 62% od nominalnej oraz porównano wyniki z wynikiem przy sprężynie nominalnej. Przyjęte sztywności sprężyny powrotnej do obliczeń zawarto w tabeli 6.3.

Zmiana sztywności sprężyny powrotnej w stosunku do nominalnej	Sztywność sprężyny powrotnej $\left[\frac{N}{mm}\right]$
-60%	0,410
-40%	0,614
-20%	0,819
-15%	0,870
-10%	0,922
-5%	0,973
0% (nominalna)	1,024
+5%	1,075
+10%	1,126
+15%	1,178
+20%	1,229
+40%	1,434
+62%	1,659

Tab. 6.3. Sztywności sprężyny powrotnej przyjęte do obliczeń


Rys. 6.5. Prędkość zamka w funkcji czasu dla sprężyn powrotnych o sztywności nominalnej, mniejszej o 60%, 20% i 10% oraz większej o 10%, 20% i 62%



Rys. 6.6. Droga zamka w funkcji czasu dla sprężyn powrotnych o sztywności nominalnej, mniejszej o 60%, 20% i 10% oraz większej o 10%, 20% i 62%



Rys. 6.7. Prędkość zamka w funkcji czasu dla sprężyn powrotnych o sztywności nominalnej, mniejszej o 40, 15% i 5% oraz większej o 5%, 15% i 40%



Rys. 6.8. Droga zamka w funkcji czasu dla sprężyn powrotnych o sztywności nominalnej, mniejszej o 40, 15% i 5% oraz większej o 5%, 15% i 40%

Szczegółowszą analizę dotyczącą wyników obliczeń zawarto w tabeli 6.4. Zmiana sztywności sprężyny powrotnej ma znikomy wpływ na maksymalną prędkość zamka w ruchu wstecznym (v_{wmax}). Przy najmniejszej sztywności prędkość ta wynosi 6,48 $\frac{m}{s}$, a przy największej 6,41 $\frac{m}{s}$, czyli odpowiednio więcej o 0,03 $\frac{m}{s}$ (0,47%) i mniej o 0,04 $\frac{m}{s}$ (0,62%) od wartości nominalnej. Czas ruchu w tylne położenie (t_w) wynosi wtedy odpowiednio 10,6 ms oraz 16,9 ms, czyli mniej o 1,3 ms (10,92%) oraz więcej o 5,0 ms (42,02%).

Mniejsza sztywność sprężyny powrotnej skutkuje większą prędkością pozostałą zamka przy zderzaku (v_p), gdzie maksymalnie wynosi ona 4,11 $\frac{m}{s}$, czyli więcej o 1,12 $\frac{m}{s}$, w procentach o 37,46%. Przy sztywności sprężyny większej o 62%, prędkość pozostała zamka przy zderzaku (v_p) wynosi 0,00 $\frac{m}{s}$, a zamek dochodzi do zderzaka. Jest to wartość graniczna i dlatego została zaprezentowana, po jej przekroczeniu zamek nie dochodzi do skrajnego tylnego położenia, co powinno mieć miejsce dla niezawodności działania broni.

Przy większej sztywności zamki osiągają większe prędkości w ruchu powrotnym (v_{pomax}) , od 1,52 $\frac{m}{s}$ do 3,60 $\frac{m}{s}$, czyli odpowiednio mniej o 1,19 $\frac{m}{s}$ (43,91%) i więcej o 0,89 $\frac{m}{s}$ (32,84%) w stosunku do wartości nominalnej. W tym wypadku różnice są dużo bardziej istotne niż w ruchu wstecznym. Wraz ze spadkiem sztywności sprężyny powrotnej wydłuża się powrót zamka (t_{po}) w przednie położenie i wynosi on od 21,2 *ms* do 49,8 *ms*, czyli odpowiednio mniej o 7,2 $\frac{m}{s}$ (25,35%) i więcej 21,4 *ms* (75,35%) w stosunku do wartości nominalnej. Przy zmniejszeniu sztywności o więcej niż 60%, zamek nie posiada wystarczającej energii, aby dosłać kolejny nabój do komory nabojowej i zatrzymuje się w trakcie powrotu, nie dochodząc w przednie położenie.

Zmiana sztywności w stosunku do nominalnej [%]	$v_{wmax}[\frac{m}{s}]$	Δv _{wmax} [%]	$t_w[ms]$	$\Delta t_w[\%]$	$v_p[\frac{m}{s}]$	Δ <i>v</i> _p [%]	$v_{pomax}[\frac{m}{s}]$	Δν _{pomax} [%]	$t_{po}[ms]$	$\Delta t_{po}[\%]$
-60	6,48	+0,47	10,6	-10,92	4,11	+37,46	1,52	-43,91	49,8	+75,35
-40	6,47	+0,31	11,1	-6,72	3,72	+24,41	2,15	-20,66	36,6	+28,87
-20	6,46	+0,16	11,3	-5,04	3,4	+13,71	2,5	-7,75	31,8	+11,97
-15	6,46	+0,16	11,4	-4,20	3,28	+9,70	2,6	-4,06	30,7	+8,10
-10	6,45	0,00	11,4	-4,20	3,26	+9,03	2,69	-0,74	29,6	+4,23
-5	6,45	0,00	11,5	-3,36	3,19	+6,69	2,71	0,00	28,8	+1,41
0	6,45	0,00	11,9	0,00	2,99	0,00	2,71	0,00	28,4	0,00
+5	6,45	0,00	11,9	0,00	2,83	-5,35	2,76	+1,85	27,8	-2,11
+10	6,44	-0,16	12,1	+1,68	2,7	-9,70	2,78	+2,58	27,4	-3,52
+15	6,43	-0,31	12,3	+3,36	2,55	-14,72	2,85	+5,17	26,7	-5,99
+20	6,44	-0,16	12,5	+5,04	2,37	-20,74	2,91	+7,38	26,2	-7,75
+40	6,43	-0,31	12,6	+5,88	2,23	-25,42	3,15	+16,24	23,7	-16,55
+62	6,41	-0,62	16,9	+42,02	0,00	-100,00	3,60	+32,84	21,2	-25,35

Tab. 6.4. Analiza wyników obliczeń dla różnych sztywności sprężyn powrotnych

Podsumowując, sztywność sprężyny powrotnej ma pomijalnie mały wpływ na maksymalną prędkość zamka w ruchu wstecznym. Dla prędkości pozostałej przy zderzaku ma z kolei duże znaczenie, różnice w prędkościach ruchu powrotnego zamka są również istotne. Im sztywniejsza sprężyna, tym dłuższy czas ruchu zamka do tylnego położenia i jednocześnie krótszy do przedniego położenia. Różnice w czasach powrotu są większe niż w czasach ruchu wstecznego zamka.

Przeprowadzając powyższe obliczenia numeryczne dowiedziono, że dobrane charakterystyki sprężyny powrotnej zapewnią prawidłową pracę broni. Zmniejszając lub zwiększając jej sztywność nawet o kilkadziesiąt procent nie powoduje to zmian w charakterystykach kinematycznych broni na tyle, aby uniemożliwić jej prawidłowe działanie.

Doświadczenia pokazują, że sprężyny wykonywane są z dokładnością ±15%. Prowadzi to do jednoznacznego wniosku: taka niedokładność nie niesie ze sobą żadnych niepożądanych skutków dla pewności i niezawodności działania broni wzorcowej.

6.3. Wpływ drogi odrzutu lufy na charakterystyki kinematyczne

Obliczenia prędkości (rys. 6.9) i drogi (rys. 6.10) zamka w funkcji czasu przeprowadzono dla trzech wariantów drogi lufy w trakcie ruchu wstecznego, czyli 6 mm (-2 mm, -25%), 7 mm (-1 mm, -12,5%) oraz 9 mm (+1 mm, +12,5%). Nominalna wartość to 8 mm.



Rys. 6.9. Prędkość zamka i lufy w funkcji czasu dla drogi odrzutu lufy wynoszącej: 6 mm, 7 mm, 8 mm (wartość nominalna) oraz 9 mm



Rys. 6.10. Droga zamka i lufy w funkcji czasu dla drogi odrzutu lufy wynoszącej: 6 mm, 7 mm, 8 mm (wartość nominalna) oraz 9 mm

Analizę dotyczącą wyników obliczeń zawarto w tabeli 6.5. Różnice prędkości (v_{wmax}), czasów ruchu zamka (Δt_w) w ruchu wstecznym oraz prędkości pozostałej przy zderzaku (Δv_p) są nieduże i nie mają większego znaczenia w praktyce inżynierskiej.

Obliczenia wykazały jednak, że różnice w czasach ruchu powrotnego zamka (Δt_{po}) są największe ze względu na zmieniające się znacząco opory dosyłania kolejnego naboju do komory nabojowej. Ma to związek z układem konstrukcyjnym wślizgu lufy, który przewidziany był dla ruchu lufy wynoszącego 8 mm. Okazało się jednak, że opory te najmniejsze są przy lufie przemieszczającej się na odległość 6 mm, co jest cenną wskazówką przy prowadzeniu dalszych prac badawczo-rozwojowych.

Droga odrzutu lufy	6 mm (-2 mm, -25%)	7 mm (-1 mm, -12,5%)	Nominalny 8 mm	9 mm (+1 mm, +12,5%)
$v_{wmax}[\frac{m}{s}]$	6,28	6,44	6,45	6,45
Δv_{wmax} [%]	-2,64	-0,16	0,00	0,00
$t_w[ms]$	11,5	11,7	11,9	11,9
Δt_w [%]	-3,36	-1,68	0,00	0,00
$v_p[\frac{m}{s}]$	3,21	3,1	2,99	2,93
$\Delta v_p[\%]$	+7,36	+3,68	0,00	-2,01
$v_{pomax}[\frac{m}{s}]$	2,97	2,95	2,71	2,42
$\Delta v_{pomax}[\%]$	+9,59	+8,86	0,00	-10,70
$t_{po}[ms]$	27,0	27,3	28,4	30,2
Δt_{po} [%]	-4,93	-3,87	0,00	+6,34

Tab. 6.5. Analiza wyników obliczeń dla różnych dróg odrzutu lufy

Podsumowując, drogę odrzutu lufy należy dobierać tak, aby przede wszystkim, jej ruch zapewniał wylot pocisku przed rozpoczęciem przekaszania się lufy, w przeciwnym razie nie dałoby się zapewnić odpowiedniej celności broni. Odryglowanie lufy powinno nastąpić w momencie, gdy ciśnienie gazów prochowych spadnie to wartości pozwalającej na wyciągnięcie łuski z komory nabojowej bez jej zakleszczenia. Trzecim kryterium jest odpowiednie ułożenie lufy zapewniające jak najlepsze dosłanie kolejnego naboju z magazynka do komory nabojowej, z jak najmniejszymi oporami dla jak największej niezawodności.

6.4. Wpływ oporów kurka oraz przerywacza na charakterystyki kinematyczne

Obliczenia prędkości (rys. 6.11) i drogi zamka (rys. 6.12) wykonano również dla wariantów broni: bez oporów pracy kurka oraz bez oporów pracy przerywacza i porównano wyniki z wynikami dla broni nominalnej. Pozwoli to na sprawdzenie wpływu sił oporu kurka oraz przerywacza na prędkość i przemieszczenie zamka w funkcji czasu.



Rys. 6.11. Prędkość zamka w funkcji czasu dla wariantu nominalnego, bez kurka i bez przerywacza



Rys. 6.12. Droga zamka w funkcji czasu dla wariantu nominalnego oraz bez kurka i bez przerywacza

Analizę wyników obliczeń umieszczono w tabeli 6.6. Wpływ oporu kurka na prędkość maksymalną zamka w ruchu wstecznym (v_{wmax}) jest niewielki, a w przypadku oporu przerywacza pomijalnie mały, zmiana (Δv_{wmax}) w pierwszym przypadku wynosi zaledwie kilka procent, a w drugim ułamek procenta. Te dwa rodzaje oporów mają również mały wpływ na prędkość (v_{pomax}) i czas ruchu (t_{po}) zamka podczas powrotu w przednie położenie.

Natomiast w przypadku prędkości pozostałej przy zderzaku (v_p) oraz czasie ruchu wstecznego zamka (t_w) udział tych oporów jest większy. Prędkości (v_p) są większe dla wariantów bez kurka oraz bez przerywacza w stosunku do broni nominalnej, różnice wynoszą odpowiednio: 0,61 $\frac{m}{s}$ i 0,16 $\frac{m}{s}$, co w ujęciu procentowym (Δv_p) daje odpowiednio: 20,40% i 5,35%. Czas ruchu wstecznego zamka (t_w) jest krótszy odpowiednio o: 1,2 ms i 0,4 ms, co w ujęciu procentowym (Δt_w) daje odpowiednio: 10,08% i 3,36%.

Wariant broni	Nominalny	Bez kurka	Bez przerywacza
$v_{wmax}[\frac{m}{s}]$	6,45	6,85	6,46
$\Delta v_{wmax}[\%]$	0,00	+6,20	+0,16
$t_w[ms]$	11,9	10,7	11,5
$\Delta t_w[\%]$	0,00	-10,08	-3,36
$v_p[\frac{m}{s}]$	2,99	3,60	3,15
Δv_p [%]	0,00	+20,40	+5,35
$v_{pomax}[\frac{m}{s}]$	2,71	2,77	2,76
$\Delta v_{pomax}[\%]$	0,00	+2,21	+1,85
$t_{po}[ms]$	28,4	27,9	28,0
$\Delta t_{po}[\%]$	0,00	-1,76	-1,41

Tab. 6.6. Analiza wyników obliczeń dla wariantu broni nominalnej, bez kurka i bez przerywacza

Podsumowując, opory mechanizmów broni tj. kurka czy przerywacza, spośród wszystkich przywołanych parametrów, mają najistotniejszy wpływ na prędkość pozostałą przy zderzaku (v_p) i czas ruchu wstecznego (t_w). Dzieje się tak, ponieważ oddziaływanie kurka na zamek jest największe w trakcie jego ruchu do tyłu, podczas jego powrotu kurek jest już napięty i zaczepiony o zaczep kurka i nie wykonuje ruchu. Dlatego siła napięcia sprężyny kurka (F_{sk} , rys. 2.1), tarcie między kurkiem a jego osią, tarcie między kurkiem a jego zaczep występują tylko w trakcie ruchu wstecznego zamka. Tarcie między zamkiem a kurkiem występuje w trakcie ruchu wstecznego zamka oraz w początkowym okresie jego powrotu.

Podobnie jest w przypadku przerywacza gdzie siła potrzebna do napięcia sprężyny szyny spustowej (F_{ss} , rys. 2.1), podczas obniżania go w dół, występuje tylko w ruchu wstecznym, czyli wtedy oddziaływanie na zamek jest największe. Natomiast tarcie między przerywaczem a zamkiem ma miejsce w ruchu zamka do tyłu i do przodu. Dla broni wzorcowej udział sił oporu kurka jest większy niż sił oporu przerywacza, ta zależność powinna sprawdzać się dla zdecydowanej większości broni.

6.5. Wpływ oporów dosyłania kolejnego naboju z magazynka oraz wyciągania i wyrzucania łuski na charakterystyki kinematyczne

Prędkości (rys. 6.13) i drogi zamka (rys. 6.14) przebadano dla wariantów broni: bez oporów dosyłania kolejnego naboju z magazynka do komory nabojowej oraz bez oporów wyciągania i wyrzucania łuski z komory nabojowej i porównano ich wyniki z wynikami dla broni nominalnej. Obliczenia te umożliwią sprawdzenie wpływu sił oporu związanych z dosyłaniem naboju oraz wyrzucaniem łuski na prędkość i drogę zamka w funkcji czasu.



Rys. 6.13. Prędkość zamka w funkcji czasu dla wariantu nominalnego, bez dosyłania kolejnego naboju z magazynka i bez wyrzucania łuski



Rys. 6.14. Droga zamka w funkcji czasu dla wariantu nominalnego, bez dosyłania kolejnego naboju z magazynka i bez wyrzucania łuski

Dokładniejszą analizę wyników obliczeń zawarto w tabeli 6.7. Wzrost prędkości maksymalnej (Δv_{wmax}) w ruchu wstecznym dla wariantu bez dosyłania kolejnego naboju, po zaokrągleniu do części setnych wynosi 0,00. Przy tym wariancie nie występuje tarcie między nabojem znajdującym się w magazynku a zamkiem, jak jest to w przypadku konfiguracji nominalnej, ale wpływ tego tarcia jest tak mały, że nie rzutuje to na zauważalną zmianę prędkości (Δv_{wmax}). Z kolei powoduje to bardziej znaczące skrócenie czasu ruchu zamka do tyłu (t_w), o 0,84%. Natomiast w ruchu powrotnym, różnice w stosunku do broni nominalnej dla prędkości maksymalnej (v_{pomax}) i czasu tego ruchu (t_{po}) są dużo istotniejsze, gdyż właśnie w trakcie powrotu zamka, w broni nominalnej opory z tym związane są znacznie większe. Składają się na nie tarcie miedzy nabojem a pudełkiem magazynka, donośnikiem, lufą, zamkiem, wyciągiem oraz siły spowodowane oddziaływaniem sprężyn magazynka i wyciągu.

Dla wariantu z brakiem wyrzucenia łuski prędkość (v_{wmax}) zwiększa się minimalnie. Czas ruchu wstecznego zamka (t_w) oraz prędkość pozostała przy zderzaku (v_p) ulegają największej zmianie. Z kolei na parametry takie jak prędkość maksymalna zamka w ruchu powrotnym (v_{pomax}) czy czas ruchu powrotnego zamka (t_{po}) brak wyciągania i wyrzucania łuski nie ma większego wpływu. Dzieje się tak, dlatego, że te opory występują tylko w trakcie ruchu wstecznego zamka, składa się na to tarcie łuski o komorę nabojową, tarcie łuski z zamkiem oraz wyciągiem i wyrzutnikiem, dyssypacja energii uderzenia łuski o wyrzutnik, siły potrzebne na ugięcie sprężyny wyciągu, a co najważniejsze łuska zwiększa masą biorącą udział w odrzucie. Minimalne zmiany (Δv_{pomax} , Δt_{po}) następują na skutek większej prędkości odbicia zamka od zderzaka, czyli w broni wzorcowej od szkieletu, co z kolei ma miejsce przez zwiększenie prędkości pozostałej przy zderzaku (v_p).

Wariant broni	Nominalny	Bez dosyłania naboju	Bez wyrzucania łuski
$v_{wmax}[\frac{m}{s}]$	6,45	6,45	6,52
$\Delta v_{wmax}[\%]$	0,00	0,00	+1,09
$t_w[ms]$	11,9	11,8	10,8
$\Delta t_w[\%]$	0,00	-0,84	-9,24
$v_p[\frac{m}{s}]$	2,99	3,03	3,60
Δv_p [%]	0,00	+1,34	+20,40
$v_{pomax}[\frac{m}{s}]$	2,71	3,34	2,77
$\Delta v_{pomax}[\%]$	0,00	+23,25	+2,21
$t_{po}[ms]$	28,4	25,3	28,1
$\Delta t_{po}[\%]$	0,00	-10,92	-1,06

Tab. 6.7. Analiza wyników obliczeń dla wariantu broni nominalnej, bez dosyłania kolejnego naboju z magazynka oraz bez wyciągania i wyrzucania łuski

6.6. Wpływ współczynników tarcia na charakterystyki kinematyczne

Obliczenia prędkości (rys. 6.15) i drogi zamka (rys. 6.16) przeprowadzono dla wariantów broni z różnymi współczynnikami tarcia. Wariant nominalny zakłada, że broń jest nasmarowana, ponieważ znajdowała się w takim stanie przy badaniach eksperymentalnych służących do walidacji modelu numerycznego. Kolejnymi wariantami są: broń sucha (nienasmarowana) oraz model bez tarcia. Dzięki temu możliwe będzie przebadanie wpływu tarcia na charakterystyki kinematyczne broni. Przyjęte współczynniki tarcia umieszczono w tabeli 6.8. Jak już wspomniano ze stali wykonana jest większość części broni, z itamidu B-GF-35 szkielet i donośnik magazynka, łuska i płaszcz pocisku są mosiężne.

102, 101]							
Wariant współczynnika tarcia	0 (nomina nasmarc	0 (nominalny, broń nasmarowana) 1 (broń sucha)		sucha)	2 (brak tarcia)		
Rodzaj współczynnika	μ _s	μ _d	μ _s	μ_d	μ _s	μ_d	
Stal – stal	0,15	0,08	0,2	0,15	0	0	
Stal - mosiądz	0,11	0,06	0,19	0,15	0	0	
Mosiądz – mosiądz	0,10	0,05	0,30	0,12	0	0	
Stal – itamid	0,15	0,10	0,35	0,20	0	0	
Mosiądz – itamid	0,12	0,08	0,25	0,15	0	0	

Tab. 6.8. Przyjęte wartości współczynników tarcia dla trzech wariantów modeli numerycznych [101, 102, 104]



Rys. 6.15. Prędkość zamka dla wariantów modeli numerycznych z różnymi współczynnikami tarcia



Rys. 6.16. Droga zamka dla wariantów modeli numerycznych z różnymi współczynnikami tarcia

Analizę liczbową otrzymanych wyników przedstawiono za pomocą tabeli 6.9. Oczywistym wnioskiem jest, że przy większych współczynnikach tarcia wszystkie prędkości $(v_{wmax}, v_p, v_{pomax})$ są mniejsze oraz czasy ruchu (t_w, t_{po}) większe, a przy mniejszych wartościach współczynników lub przy braku tarcia na odwrót. Zmiany prędkości maksymalnej w ruchu wstecznym (Δv_{wmax}) oraz czasu ruchu wstecznego zamka (Δt_w) są mniejsze niż zmiany prędkości maksymalnej w ruchu powrotnym (Δv_{pomax}) i zmiany czasu ruchu powrotnego (Δt_{po}) . Dzieje się tak gdyż udział tarcia w siłach działających na elementy broni w ruchu wstecznym jest dużo mniejszy niż w ruchu powrotnym. W ruchu do tyłu występuje siła odziaływania od ciśnienia gazów prochowych na zamek, która posiada dużą wartość. Zauważalne jest to zwłaszcza dla prędkości maksymalnej w ruchu wstecznym (v_{wmax}) , tym bardziej, że droga pokonana do czasu osiągnięcia tej prędkości jest niewielka, więc strata energii na tarcie jest mało istotna. Dlatego też w tym okresie ruchu (do osiągnięcia maksymalnej prędkości w ruchu wstecznym) tarcie może być pominięte w praktycznych zastosowaniach obliczeń tego typu.

Wariant współczynnika tarcia	0 (nominalny, broń nasmarowana)	1 (broń sucha)	2 (brak tarcia)
$v_{wmax}[\frac{m}{s}]$	6,45	6,40	6,55
$\Delta v_{wmax}[\%]$	0,00	-0,78	+1,55
$t_w[ms]$	11,9	13,0	11,2
$\Delta t_w[\%]$	0,00	+9,24	-5,88
$v_p[\frac{m}{s}]$	2,99	2,33	3,35
$\Delta v_p[\%]$	0,00	-22,07	+12,04
$v_{pomax}[\frac{m}{s}]$	2,71	2,20	3,13
$\Delta v_{pomax}[\%]$	0,00	-18,82	+15,50
$t_{po}[ms]$	28,4	33,3	26,3
Δt_{po} [%]	0,00	+17,25	-7,39

Tab. 6.9. Analiza wyników obliczeń dla modeli o różnych współczynnikach tarcia

6.7. Wpływ siły oporów pocisku w lufie na charakterystyki kinematyczne

Obliczenia prędkości i drogi zamka w funkcji czasu przeprowadzono przy założeniu, że siły związane z rozcalaniem pocisku z łuską (F_{pl}), wcinaniem się pocisku w bruzdy przewodu lufy (F_{wp}) oraz przetłaczaniem pocisku przez przewód lufy (F_{pl}) są takie jak w artykule [75], a w drugim przypadku nie występują. Wyniki te porównano z modelem nominalnym, gdzie siły (F_{pl} , F_{wp} , F_{pl}) dobrano na podstawie [38].

Symulację tę przeprowadzono, aby dowieść jak duży wpływ na charakterystyki kinematyczne broni działającej na zasadzie krótkiego odrzutu lufy mają siły związane z oporami ruchu pocisku. Wyniki obliczeń warz z porównaniem do wyników dla modelu nominalnego przedstawiono na wykresach prędkości w funkcji czasu (rys. 6.17) oraz drogi w funkcji czasu (rys. 6.18), a analizę liczbową w tabeli 6.10.



Rys. 6.17. Wyniki obliczeń prędkości zamka w funkcji czasu dla wariantu nominalnego, z siłą oporu pocisku wg artykułu [75] oraz bez oporów związanych z ruchem pocisku w lufie



Rys. 6.18. Wyniki obliczeń prędkości i drogi zamka w funkcji czasu dla wariantu nominalnego, z siłą oporu pocisku wg artykułu [75] oraz bez oporów związanych z ruchem pocisku w lufie

Wariant modelu numerycznego	Nominalny	Siła oporu pocisku wg artykułu [75]	Bez oporów związanych z ruchem pocisku w lufie
$v_{wmax}[\frac{m}{s}]$	6,45	6,59	7,68
Δv_{wmax} [%]	0,00	+2,17	+19,07
$t_w[ms]$	11,9	11,0	8,7
Δt_w [%]	0,00	-7,56	-26,89
$v_p[\frac{m}{s}]$	2,99	3,35	4,88
Δv_p [%]	0,00	+12,04	+63,21
$v_{pomax}[\frac{m}{s}]$	2,71	2,72	2,76
Δv_{pomax} [%]	0,00	+0,37	+1,85
$t_{po}[ms]$	28,4	28,4	28,3
Δt_{po} [%]	0,00	0,00	-0,35

Tab. 6.10. Analiza wyników obliczeń dla wariantu broni nominalnej, bez kurka i bez przerywacza

Różnice między modelem nominalnym a modelem z siłami oporu pocisku w lufie przyjętymi na podstawie opracowania [75] są niewielkie, co dowodzi, że zostały one wyznaczone przez autorów dość dokładnie. Różnice w charakterystykach kinematycznych w ruchu wstecznym zamka wynoszą kilka procent, co jest dobrym wynikiem w tego typu obliczeniach. Jedynie różnica w prędkości zamka pozostała przy zderzaku (Δv_p) jest nieco większa i wynosi 12,04%.

Wpływ sił oporów pocisku jest bardzo istotny i przy obliczeniach tego typu musi być uwzględniony. Bez nich rosną znacząco prędkości (v_{wmax}, v_p) i maleją czasy ruchu wstecznego zamka (t_w) .

Różnice w charakterystykach kinematycznych w ruchu powrotnym nie mają większego znaczenia we wszystkich przypadkach. Wynika to z tego, że siły oporów pocisku w lufie występują tylko w trakcie ruchu wstecznego zamka. Choć trzeba pamiętać o tym, że w niektórych konstrukcjach większa prędkość zamka pozostała przy zderzaku (v_p) , powodowała będzie dużo bardziej istotny wzrost prędkości odbicia, która to prędkość w broni wzorcowej praktycznie nie występuje ze względu na duże tłumienie zderzaka. Jeśli prędkość odbicia zmieni się to pozostałe parametry w ruchu powrotnym również ulegną zmianie.

6.8. Wpływ ciśnienia gazów prochowych na charakterystyki kinematyczne

Wykonanie obliczeń dla różnych wartości ciśnienia gazów prochowych sprawdzi czułość układu na zmianę wymuszenia oraz pozwoli przebadać zachowanie broni dla różnych rodzajów amunicji. Dlatego też przyjęto maksymalne ciśnienia gazów prochowych (p_{max}) mniejsze o 5% i 10% oraz większe o 5%, 10%, 15% i 20% względem ciśnienia otrzymanego eksperymentalnie, które jest ciśnieniem nominalnym (tab. 6.11, rys. 6.19). Przyjęte wyższe wartości od nominalnej są bliskie ciśnieniom maksymalnym odpowiadającym amunicji produkowanej według różnych standardów:

- C.I.P. 235 MPa [122],
- SAAMI 241 MPa dla amunicji zwykłej oraz 265 MPa dla amunicji o zwiększonym ciśnieniu +P [123],
- NATO 252 MPa [80].

Tab. 6.11. Ciśnienia gazów prochowych przyjęte do obliczeń

	551
Zmiana ciśnienia gazów prochowych w stosunku do	Maksymalne ciśnienie gazów
nominalnego	prochowych [MPa]
-10%	198
-5%	209
0% (nominalne)	220
+5%	231
+10%	242
+15%	253
+20%	264



Wyniki obliczeń prędkości zamka umieszczono na rysunku 6.20, a drogi w funkcji czasu na rysunku 6.21.







Zmiana ciśnienia gazów prochowych ma znaczący wpływ na maksymalną prędkość zamka w ruchu wstecznym (v_{wmax}). Przy najniższym ciśnieniu prędkość ta wynosi 5,66 $\frac{m}{s}$, a przy najwyższym z obliczonych 8,01 $\frac{m}{s}$, co daje różnicę wynoszącą 2,35 $\frac{m}{s}$, czyli więcej o 41,52%.

Mniejsze ciśnienie skutkuje też mniejszą prędkością zamka pozostałą przy zderzaku (v_p) , gdzie minimalnie wynosi ona 1,36 $\frac{m}{s}$, a czas ruchu w tylne położenie (t_w) wynosi wtedy 16,2 ms. Przy największym ciśnieniu zamek dochodzi do zderzaka w czasie (t_w) 8,4 ms tracąc w tym momencie prędkość (v_p) do 5,20 $\frac{m}{s}$. Różnica w czasie (Δt_w) wynosi 7,8 ms, w prędkości (Δv_p) 3,84 $\frac{m}{s}$. W procentach czas (Δt_w) dla ciśnienia gazów prochowych najniższego w stosunku do najwyższego maleje o 48,15%, a prędkość pozostała przy zderzaku (Δv_p) rośnie o 282,35%.

Zmiana ciśnienia gazów prochowych ma znikomy wpływ na czas ruchu powrotnego zamka (t_{po}) w przednie położenie, gdzie różnice nie przekraczają 1,5% względem wartości nominalnej. Ta sama zależność występuje dla prędkości maksymalnej w ruchu powrotnym (v_{pomax}).

Szczegółowszą analizę dotyczącą wyników obliczeń zawarto w tabeli 6.12.

Maksymalne ciśnienie gazów prochowych [MPa]	198	209	220 (nominalne)	231	242	253	264
$v_{wmax}[\frac{m}{s}]$	5,66	6,04	6,45	6,84	7,24	7,63	8,01
Δv_{wmax} [%]	-12,25	-6,36	0,00	+6,05	+12,25	+18,29	+24,19
$t_w[ms]$	16,2	13,3	11,9	10,6	9,8	8,9	8,4
Δt_w [%]	+36,13	+11,76	0,00	-10,92	-17,65	-25,21	-29,41
$v_p[\frac{m}{s}]$	1,36	2,34	2,99	3,63	4,13	4,72	5,20
Δv_p [%]	-54,52	-21,74	0,00	+21,40	+38,13	+57,86	+73,91
$v_{pomax}[\frac{m}{s}]$	2,74	2,77	2,71	2,74	2,74	2,75	2,75
$\Delta v_{pomax}[\%]$	+1,11	+2,21	0,00	+1,11	+1,11	+1,48	+1,48
$t_{po}[ms]$	28,3	28,0	28,4	28,0	28,2	28,2	28,2
$\Delta t_{po}[\%]$	-0,35	-1,41	0,00	-1,41	-0,70	-0,70	-0,70

Tab. 6.12. Analiza wyników obliczeń dla modeli o ciśnieniach gazów prochowych

Podsumowując, zmiana ciśnienie gazów prochowych wpływa bardzo istotnie na charakterystyki kinematyczne broni w ruchu wstecznym zamka. Natomiast w ruchu powrotnym, w tym przypadku ten wpływ jest znikomy. Dzieje się tak, ponieważ siła ciśnienia gazów prochowych występują tylko w trakcie ruchu wstecznego zamka, a zderzak posiada duże tłumienie i nie występuje odbicie.

7. PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE OPRACOWANYCH METOD NUMERYCZNYCH

Obliczenia numeryczne zostały wykorzystane w konstrukcji pistoletu PW INKA, prace nad nim prowadzone były od 2015 roku. Dokumentacja została opracowana w 2016 roku. Cztery sztuki modelu (fot. 7.1) zostały wykonane w 2017 roku. Na przełomie lat 2017 i 2018 prowadzono badania modelu.



Fot. 7.1. Model pistoletu – widok z lewej i prawej strony broni

W 2019 roku wykonano prototypy pistoletu (fot. 7.2). W latach 2020-2022 trwają badania prototypu.



Fot. 7.2. Prototyp pistoletu – widok z lewej i prawej strony broni

Prototyp posiada możliwość montażu celownika kolimatorowego (fot. 7.3). Wymaga to modyfikacji zamka poprzez wykonanie ścięcia w jego górnej części. Istnieją dwa typy zamków: zamek standardowy oraz zamek ze ścięciem na celownik kolimatorowy.

Prototyp ma również możliwość przykręcenia tłumika dźwięku (fot. 7.4) dzięki zastosowaniu wydłużonej lufy z gwintem. Przewidziano dwa rodzaje luf: zwykłą oraz wydłużoną.



Fot. 7.3. Prototyp pistoletu z celownikiem kolimatorowym RMSc firmy SHIELD



Fot. 7.4. Prototyp pistoletu z celownikiem kolimatorowym Sig Sauer Romeo 1 i tłumikiem dźwięku Impuls-IIAT firmy B&T AG

Pistolet PW INKA jest bronią automatyczną, samopowtarzalną, działa na zasadzie krótkiego odrzutu lufy, ryglowanie następuje przez przekoszenie lufy w płaszczyźnie pionowej [124]. Charakterystyki taktyczno-techniczne zostały zawarte w tabeli 7.1.

Rodzaj naboju	9x19 mm Parabellum		
Zasada działania	Krótki odrzut lufy		
Machanizm ruglowy	Występ w tylnej części lufy współpracujący		
Meenamzin Tygiowy	z oknem wyrzutowym łusek w zamku		
Mechanizm spustowo-uderzeniowy	SA/DA z kurkiem zewnętrznym		
Siła spustu (SA/DA)	15/50 N		
Droga spustu (SA/DA)	7,5/15 mm		
Pojemność magazynka	15 nabojów		
Długość broni	196,5 mm		
Wysokość broni	138,8 mm		
Szerokość broni	35 mm		
Zarys przewodu lufy	Poligonalny		
Długość lufy	114 mm		
Skok bruzd lufy	250 mm		
Długość linii celowniczej	171,6 mm		
Masa pistoletu z pustym magazynkiem	780 g		
	Otwarte, szczerbinkowe, z możliwością		
Przyrządy celownicze	regulacji, trytowe, możliwość montażu		
	celownika kolimatorowego		
Mechanizmy zabezpieczające	Blokada iglicy; zwalniacz kurka; przerywacz		
Zmienna geometria chwytu	3 rozmiary nakładek chwytu		
	Szyna NATO według STANAG 4694;		
	dostępność dla strzelców prawo- i lewo-		
Inno dono	ręcznych; prosta obsługa/rozkładanie bez użycia		
	narzędzi; wskaźnik obecności naboju		
	w komorze nabojowej na wyciągu; możliwość		
	przyłączenia tłumika dźwięku		

Tab. 7.1. Charakterystyki taktyczno-techniczne prototypu pistoletu PW INKA [125-126]

Konstruktorami pistoletu byli Przemysław Badurowicz, Wiesław Stępniak oraz Krzysztof Szabłowski, pracownicy WITU. Wiodącą rolę, w opracowaniu koncepcji, dokumentacji konstrukcyjnej oraz prowadzeniu badań pistoletu miał P. Badurowicz, natomiast obliczenia numeryczne wykonał z udziałem Przemysława Kupidury i Bartosza Fikusa z Wojskowej Akademii Technicznej.

Pistolet objęty jest ochroną poprzez znak towarowy, trzy wzory przemysłowe oraz dwa zgłoszenia patentowe:

- P. Badurowicz, W. Stępniak, Z. Lewandowski, S. Kupaj, **Znak towarowy** dotyczący nazwy pistoletu pt. "9x19 mm pistolet PW INKA", nr 017925117, 2018.
- P. Badurowicz, W. Stępniak, Z. Lewandowski, S. Kupaj, Wzór przemysłowy pistolet PW INKA, nr 005320512-0001, 2018.
- P. Badurowicz, W. Stępniak, Z. Lewandowski, S. Kupaj, Wzór przemysłowy zamek pistoletu PW INKA, nr 005320512-0002, 2018.

- P. Badurowicz, W. Stępniak, Z. Lewandowski, S. Kupaj, **Wzór przemysłowy** kabura do pistoletu PW INKA, nr 005580040-0001, 2018.
- P. Badurowicz, W. Stępniak, W. Wasiak, Z. Lewandowski, S. Kupaj, P. Dymczak, **Patent** pt. "Zespół zwalniacza kurka pistoletu", nr Pat.239414, data udzielenia prawa 01.09.2021., nr zgłoszenia P.431623, data zgłoszenia 28.10.2019.
- P. Badurowicz, W. Stępniak, W. Wasiak, Z. Lewandowski, S. Kupaj, P. Dymczak, **Patent** pt. "Mechanizm spustowy pistoletu", nr prawa wyłącznego Pat.239415, data udzielenia prawa 01.09.2021., nr zgłoszenia P.431624, data zgłoszenia 28.10.2019.

Dzięki niniejszej rozprawie realizowanej w trakcie prac badawczo-rozwojowych nad nową bronią, możliwy był dobór odpowiednich parametrów konstrukcyjnych pistoletu PW INKA. Tymi parametrami są: masa zamka oraz sztywność sprężyny powrotnej. Zespół konstruktorów dowiedział się również, że w broni nie występują obszary nadmiernej kumulacji naprężeń, które mogłyby zagrażać wytrzymałości konstrukcji. Wszystko to było możliwe na etapie projektowania broni, zanim wykonywano modele, co pomogło uniknąć wielu potencjalnych błędów konstrukcyjnych. Sprawdzono również wpływ zmiany masy zamka po montażu celownika kolimatorowego, czy wpływ stosowanej amunicji na działanie broni.

7.1. Badania prototypu pistoletu

Badania prototypu pistoletu prowadzone są według programu badań pt. "9x19 mm pistolet PW INKA, program badań prototypu" z listopada 2020. Program oparto na obowiązujących w 2020 roku Normach Obronnych dotyczących broni strzeleckiej, odnoszących się do badań, które należało wykonać dla sprawdzenia zgodności broni z Założeniami Taktyczno-Technicznymi z programu TYTAN.

Sprawdzić należy parametry broni wymienione poniżej. Część prac została wykonana, a wyniki opisano krótkim komentarzem, pozostałe badania czekają na realizację.

- 1. Badanie prędkości początkowej pocisku (V_0), potrzebne do określenia spadku prędkości początkowej pocisku (V_0) po wykonaniu 10 000 strzałów przykładowe wyniki umieszczono w tabeli 7.2.
- Badanie celności i rozrzutu pocisków na tarczy w odległości 25 m (odchylenie ŚPT od PC oraz D₁₀₀), badania poligonowe zgodnie z normą NO-10-A500-2 [127] przykładowe wyniki umieszczono w tabeli 7.3.
- Badanie broni przy dużych kątach podniesienia i nachylenia zgodnie z Metodyką nr 14 WT 0233-Uzbr. [128] – nie wystąpiły zacięcia uniemożliwiające strzelanie, wynik badania pozytywny.
- 4. Badanie zdatności broni do pracy po upadku z wysokości 0,75 m nie doszło do uszkodzenia żadnej z części pistoletu oraz broń jest w stanie strzelać bez zacięć, wynik badania pozytywny.
- 5. Badanie bezpieczeństwa broni zgodnie z normą NO-10-A500-4 [129], badanie bezpieczeństwa przy upadku z wysokości 1,5 m nie nastąpiło zbicie spłoni przy upadku, wynik badania pozytywny.

- Sprawdzanie działania pistoletu dużą ilością strzałów (badanie żywotności) 10 000 strzałów – badanie w trakcie realizacji.
- 6.1. Po wykonaniu 10 000 strzałów należy sprawdzić rozrzut D₁₀₀ wymaga zakończenia badania żywotności.
- 6.2. Po wykonaniu 10 000 strzałów należy sprawdzić parametr V_0 wymaga zakończenia badania żywotności.
- 7. Badanie odporności pistoletu na oddziaływanie czynników środowiskowych.
- 7.1. Odporność na pył dynamiczny (piasek), badanie pyłoszczelności i pyłoodporności zgodnie z normą NO-10-A500-6 [130] nie wystąpiły zacięcia uniemożliwiające strzelanie, wynik badania pozytywny.
- 7.2. Badanie w warunkach wysokich temperatur 323K ±3K (50°C ±3°C), zgodnie z metodyką nr 16 WT 0233-Uzbr. [128] nie wystąpiły zacięcia uniemożliwiające strzelanie, wynik badania pozytywny.
- 7.3. Badanie w warunkach niskich temperatur 233K ±3K (-40°C ±3°C), zgodnie z metodyką nr 19 WT 0233-Uzbr. [128] nie wystąpiły zacięcia uniemożliwiające strzelanie, wynik badania pozytywny.
- 7.4. Badanie w warunkach deszczu i po deszczu, zgodnie z normą NO-10-A500-5 [131] nie wystąpiły zacięcia uniemożliwiające strzelanie, wynik badania pozytywny.

Warunki badan	Warunki badania:						
Z każdego pistole	Z każdego pistoletu oddano po 10 strzałów.						
	Producent amunicji:						
Nr broni:	RU	AG	ZVS				
1.1.010	$\overline{V}_0 \left[\frac{m}{s}\right]$	$\Delta V_0 \left[\frac{m}{s}\right]$	$\bar{V}_0 \left[\frac{m}{s}\right]$	$\Delta V_0 \left[\frac{m}{s}\right]$			
19A0001	372,42	16,69	340,12	22,04			
19A0002	370,85	13,76	337,22	11,18			
19A0003	375,76	14,60	343,25	21,24			
19A0004	377,30	12,78	341,01	16,65			
Wnioski z badania:							

Tab. 7.2. Przykładowe wyniki badań prędkości początkowej pocisku (V_0)

Brak. Próba potrzebna do określenia spadku prędkości pocisków po oddaniu 10 000 strzałów.

gdzie:

 \overline{V}_0 – średnia arytmetyczna prędkości początkowej pocisków z dziesięciu strzałów,

 ΔV_0 – rozstęp prędkości początkowych pocisków, będący różnicą największej i najmniejszej wartości.

Data strzelania	Ilość strzałów	SPT od PC	D_{100}		
	15	10	85		
01 09 2010	15	10	85		
01.08.2019.	15	21	100		
	15	42	240		
	15	87	95		
	15	55	110		
	15	87	95		
	15	61	95		
	15	54	130		
07.08.2019.	15	61	90		
	5	45	50		
	5	0	150		
	5	32	50		
	5	64	100		
	5	93	170		
	15	35	85		
	15	43	95		
	15	36	130		
	15	72	120		
	15	32	190		
00 00 2010	15	54	190		
08.08.2019.	15	46	130		
	15	54	100		
	15	61	180		
	15	44	50		
	15	64	100		
	15	74	90		
	15	52	160		
	15	51	250		
06 11 2010	15	49	240		
00.11.2019.	15	35	145		
	15	45	200		
	15	75	230		
20.11.2019.	15	21	210		
03 12 2010	15	43	110		
03.12.2017.	15	35	300		
Wartość	średnia 📃 🗌	48,4	137,5		
ISISISWartość średnia48,4137,5Wnioski z badania:Wwniki badania mieszcza się w wartościach dopuszczalnych (odchylenia ŚPT)					

Tab. 7.3. Przykładowe wyniki celności i rozrzutu pocisków na tarczy w odległości 25 m

Wyniki badania mieszczą się w wartościach dopuszczalnych (odchylenia ŚPT od PC powinno wynosić \leq 50 mm, $D_{100} \leq$ 140 mm). Wynik badania pozytywny.

gdzie:

 $ext{SPT}$ – średni punkt trafienia, PC – punkt celowania, D_{100} – średnica okręgu zawierającego 100% przestrzelin, o środku w średnim punkcie trafienia.

7.2. Charakterystyka funkcjonowania "automatyki" pistoletu PW INKA

Działanie automatyki pistoletu PW INKA, będącego bronią wzorcową opisać można w dwunastu etapach zilustrowanych na rysunkach 7.1-7.6.

W pierwszym etapie (rys. 7.1a) pistolet znajduje się w stanie załadowanym, nabój (1) znajduje się w komorze nabojowej lufy (2), pozostałe naboje (3) w magazynku (4). Kurek (5) na skutek przeładowania ręcznego lub poprzedniego strzału znajduje się w stanie napiętym.

Drugi etap (rys. 7.1b) następuje w chwili przyłożenia siły palca strzelca do języka spustowego (6), skutkuje to zadziałaniem mechanizmu spustowego i zwolnieniem kurka (5).



Rys. 7.1. Proces strzału broni wzorcowej, a) etap 1, b) etap 2: 1 – nabój w komorze nabojowej, 2 – lufa, 3 – naboje w magazynku, 4 – magazynek, 5 – kurek, 6 – język spustowy

Etap trzeci (rys. 7.2a) zaczyna się w momencie, gdy kurek (5) na skutek działania ściśniętej sprężyny kurka (7) uderza w iglicę (8) przekazując jej swoją energię kinetyczną.

W czwartym etapie (rys. 7.2b) rozpędzona iglica (8) nakłuwa spłonkę (9). Zainicjowanie spłonki (9) skutkuje zapaleniem prochu (10), wzrostem ciśnienia wewnątrz łuski (11) i wystrzeleniem pocisku (12) z lufy (2).



Rys. 7.2. Proces strzału broni wzorcowej, a) etap 3, b) etap 4: 2 – lufa, 5 – kurek, 7 – sprężyna kurka, 8 – iglica, 9 – spłonka naboju, 10 – proch, 11 – łuska, 12 – pocisk

Etap piąty (rys. 7.3a) ma miejsce w chwili opuszczenia lufy (2) przez pocisk (12). Zamek (13) od chwili zainicjowania strzału do wylotu pocisku (12) na skutek oddziaływania ciśnienia gazów prochowych przez łuskę (11) na czółko zamka (13) przemieszcza się o ok. 2 mm, częściowo napinając sprężynę powrotną (14). Po wylocie pocisku (12) następuje spadek ciśnienia w lufie (2) do wartości ciśnienia atmosferycznego.

W szóstym etapie (rys. 7.3b) lufa (2) po przemieszczeniu z zamkiem (13) na odległość ok. 5,4 mm zaczyna przekaszać się (obniżać swój wlot) dzięki współpracy wycięcia w lufie (2) z osią sterującą (15).



Rys. 7.3. Proces strzału broni wzorcowej, a) etap 5, b) etap 6: 2 – lufa, 11 – łuska, 12 – pocisk, 13 – zamek, 14 – sprężyna powrotna, 15 – oś sterująca

Etap siódmy (rys. 7.4a) ma miejsce, gdy lufa (2) przekosiła się, jej zgrubienie w tylnej części wysunęło się z okna wyrzutowego w zamku (13), dzięki temu nastąpiło odryglowanie. W tej chwili lufa (2) zatrzymuje się, a zamek (13) kontynuuje swój ruch wsteczny. Wyciąg (16) zaczyna wyciągać łuskę (11) z komory nabojowej.

Ósmy etap (rys. 7.4b) zaczyna się, gdy łuska (11) uderza w wyrzutnik (17), po czym wylatuje przez okno wyrzutowe w zamku (13).



Rys. 7.4. Proces strzału broni wzorcowej, a) etap 7, b) etap 8: 2 – lufa, 11 – łuska, 13 – zamek, 16 – wyciąg, 17 – wyrzutnik

Etap dziewiąty (rys. 7.5a) zaczyna się, gdy zamek (13) osiągnie tylne położenie uderzając przednią swoją częścią w występ w szkielecie (18). Od tej chwili zamek (13) zaczyna swój ruch powrotny, dzięki działaniu sprężyny powrotnej (14), która była dotąd ściskana.

Etap dziesiąty (rys. 7.5a) następuje w chwili, gdy czółko zamka (13) uderza w dno łuski naboju (3) znajdującego się w magazynku (4). Rozpoczyna się proces dosyłania kolejnego naboju do komory nabojowej.



Rys. 7.5. Proces strzału broni wzorcowej, a) etap 9, b) etap 10: 3 – nabój, 4 – magazynek, 13 – zamek, 14 – sprężyna powrotna, 18 - szkielet

W jedenastym etapie (rys. 7.6a) zamek (13) zaczyna współpracę z lufą (2) zabierając ją w przednie położenie, następuje początek ponownego ryglowania.

Ostateczni etap dwunasty (rys. 7.6b) ma miejsce, gdy zamek (13) z lufą (2) znajdują się już w przednim położeniu, kolejny nabój (3) znajduje się w komorze nabojowej, kurek (5) jest powtórnie napięty. Broń gotowa jest do oddania kolejnego strzału.



Rys. 7.6. Proces strzału broni wzorcowej, a) etap 11, b) etap 12: 2 – lufa, 3 – nabój, 5 – kurek, 13- zamek

8. PODSUMOWANIE

8.1. Wnioski ogólne

- Cel główny pracy został osiągnięty, opracowano modele numeryczne w wysokim stopniu odwzorowujące rzeczywiste zachowanie się broni, co dowiedziono przeprowadzając walidację. Udowodniono, że tego typu modelowanie może być z powodzeniem realizowane dla broni strzeleckiej działającej na zasadzie krótkiego odrzutu lufy.
- 2) Metoda układów wieloczłonowych pozwala na opracowanie bardzo szczegółowego modelu broni z uwzględnieniem działania wielu części i sił. Możliwe jest dzięki temu przeprowadzenie obliczeń parametrycznych pozwalających na sprawdzenie konstrukcji broni, oszczędzając czas i redukując koszty, bez potrzeby budowania wielu modeli doświadczalnych.
- 3) Metoda elementów skończonych umożliwia otrzymanie nie tylko charakterystyk kinematycznych broni, ale również stanu naprężeń występujących w częściach. Uzyskanie dokładnego modelu jest dużo trudniejsze niż w przypadku MUW, ale siły odziaływania między częściami, niemożliwe do policzenia w MES można importować z innego programu, oszacować je lub obliczyć analitycznie i również uwzględnić, jako siły zewnętrzne, co zrealizowano z powodzeniem w niniejszej rozprawie. Obliczając naprężenia w częściach broni możliwe jest określenie obszarów najbardziej podatnych na uszkodzenia, najsłabszych miejsc w konstrukcji, które w razie dużej kumulacji naprężeń mogą zostać przekonstruowane.
- 4) Obliczenia numeryczne pozwalają na sprawdzenie konstrukcji broni już na etapie jej projektowania, dając wiele wskazówek konstruktorowi. Analizy przeprowadzone w niniejszej pracy poszerzają stan wiedzy w dziedzinie broni strzeleckiej działającej na zasadzie krótkiego odrzutu lufy. Pozwoliły na zweryfikowanie konstrukcji pistoletu PW INKA oraz udowadniają słuszność przyjętych założeń konstrukcyjnych.
- 5) Najlepszą metodą do obliczenia kinematyki broni jest zastosowanie MUW. Jeśli prowadzone prace nie przewidują uzyskania innych charakterystyk poza kinematycznymi, nie ma potrzeby stosowania MES. MES wymaga wielu uproszczeń geometrii i ograniczenia ilości elementów broni do minimum, uzyskanie charakterystyk kinematycznych jest zdecydowanie bardziej pracochłonne. Jeśli zachodzi potrzeba przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej, MES daje taką możliwość i wtedy jego stosowanie jest uzasadnione.

8.2. Wnioski szczegółowe

- 1) Obliczenia parametryczne MUW dowodzą, że:
 - a) Opory związane z pracą kurka, przerywacza, wyciąganiem i wyrzucaniem łuski oraz dosyłaniem kolejnego naboju do komory nabojowej, każdy z osobna mają mały wpływ na charakterystyki kinematyczne broni.
 - b) Tarcie miedzy częściami ma istotny wpływ na pracę automatyki broni.

- c) Uwzględnienie sił związanych z przetłaczaniem pocisku przez przewód lufy ma bardzo duże znaczenie dla obliczeń automatyki broni działającej na zasadzie krótkiego odrzutu lufy.
- d) Ciśnienie gazów prochowych jest ważnym parametrem mającym duży wpływ na kinematykę broni. Pokazuje to jak istotny jest rodzaj i jakość zastosowanej amunicji.
- Charakterystyki kinematyczne dla modeli bazowego i rozszerzonego MES pokazują jak ważne jest sumaryczne uwzględnienie sił pracy kurka, przerywacza, wyciągania i wyrzucania łuski oraz dosyłania kolejnego naboju do komory nabojowej.

8.3. Wnioski aplikacyjne

- Przedstawione podejście obliczeń numerycznych może być wykorzystywane do obliczenia charakterystyk kinematycznych, naprężeń występujących w częściach oraz funkcjonowania mechanizmów broni działających na zasadzie krótkiego odrzutu lufy podczas prowadzenia prac badawczo-rozwojowych.
- Symulacje numeryczne mogą być wykorzystane również do lepszego przebadania i weryfikacji konstrukcji istniejących, ale zawodnych w działaniu (zacięcia, pęknięcia części itp.) oraz sprawdzenia wpływu wprowadzanych zmian konstrukcyjnych na prace mechanizmów broni.

8.4. Wykorzystanie wyników w konstrukcji pistoletu PW INKA

- 1) Przeprowadzając parametryczne obliczenia numeryczne MUW dowiedziono, że:
 - a) Masa zamka oraz charakterystyki sprężyny powrotnej zostały dobrane prawidłowo.
 - b) Najkorzystniejszą wartością drogi lufy jest 6 mm, co zapewnia mniejsze opory związane z dosłaniem kolejnego naboju do komory nabojowej. Wniosek ten jest cenny przy dalszych pracach badawczo-rozwojowych.
 - c) Pistolet INKA powinien działać niezawodnie podczas strzelań z użyciem amunicji wyprodukowanej według różnych standardów oraz o niższej jakości. Potwierdzają to również strzelania prowadzone w WITU, gdzie sprawdzono niezawodność działania pistoletu używając amunicji różnych producentów wytworzonej według odmiennych standardów.
- 2) Analiza naprężeń MES udowadnia, że części zostały skonstruowane właściwie pod względem wytrzymałościowym, świadczą o tym:
 - a) Największe naprężenia dla zamka, lufy i osi sterującej wynoszą odpowiednio: 495, 428 oraz 431 MPa. Granica plastyczności dla stali, z której wykonano te części wynosi 780 MPa.
 - b) W zamku, lufie oraz osi sterującej maksymalne wartości naprężeń są podobne, nie występują części bardzo i słabo obciążone.
 - c) Nie występują nadmierne karby czy zwężenia przekrojów.
- 3) Poprawność pracy mechanizmów broni potwierdzono podczas badań eksperymentalnych mierząc charakterystyki kinematyczne zamka czujnikiem triangulacyjnym.
8.5. Elementy oryginalne wykonanych prac

- 1) Elementami oryginalnymi pracy są modele numeryczne opracowane na potrzeby **broni** działającej na zasadzie krótkiego odrzutu lufy dla dwóch metod: MUW i MES.
- 2) W ramach projektu badawczo-rozwojowego dotyczącego pistoletu PW INKA powstał jeden znak towarowy, trzy wzory przemysłowe oraz dwa patenty. Świadczy to o oryginalności przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych, które powstawały równolegle z prezentowanymi w rozprawie badaniami numeryczno-eksperymentalnymi.

8.6. Plany badawcze na przyszłość

- 1) Na podstawie wykonanych obliczeń naprężeń występujących w częściach broni możliwe będzie przeprowadzenie analizy wytrzymałościowej.
- 2) Należy dokończyć badania partii prototypowej.
- Siła rozcalania pocisku z łuską została oszacowana z założeniem jej liniowego przebiegu. Dokonane założenia są wystarczające do tego typu analiz, lecz występuje deficyt pozycji literaturowych ze szczegółowymi obliczeniami tej siły.
- 4) W oszacowaniach literaturowych uwidaczniają się rozbieżności w wartościach sił: wcinania się pocisku w bruzdy przewodu lufy oraz przetłaczania pocisku przez przewód lufy dla pocisku 9x19 mm Parabellum. Uzasadnione jest, więc wykonanie bardziej szczegółowych obliczeń dla określenia tych sił.

9. LITERATURA

- [1] P. Płatek, Analiza numeryczno-eksperymentalna wpływu charakterystyk konstrukcyjnodynamicznych na poprawność funkcjonowania automatycznej broni strzeleckiej z krótkim ruchem tłoka gazowego, rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2012.
- [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, nr 2, str. 120-123, 2011.
- [3] K. Damaziak, J. Małachowski, P. Płatek, R. Woźniak, Badania numeryczne dynamicznej odpowiedzi układu automatyki karabinka standardowego, Biuletyn WAT, Vol. LXI, Nr 3, str. 181-194, Warszawa, 2012.
- [4] K. Damaziak, A. Dębski, J. Gacek, J. Małachowski, P. Płatek, R. Woźniak, Badania numeryczne dynamicznej odpowiedzi układu automatyki karabinka podstawowego podczas strzelania ogniem seryjnym, Modelowanie Inżynierskie, nr 45, t. 14, str. 12-20, 2012.
- [5] K. Damaziak, P. Kupidura, J. Małachowski, P. Płatek, R. Woźniak, M. Zahor, Numerical Study of Modular 5.56 mm Standard Assault Rifle Referring to Dynamic Characteristics, Defence Science Journal, Vol. 65, No. 6, pp. 431-437, 2015.
- [6] J. Małachowski, P. Płatek, R. Woźniak, M. Zahor, Analiza numeryczna działania układu tłoka gazowego z suwadłem w karabinkach podstawowych Modułowego Systemu Broni Strzeleckiej kalibru 5,56 mm, Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Vol. 2, Nr 2 (4), str. 85-96, 2011.
- [7] K. Damaziak, J. Małachowski, P. Płatek, R. Woźniak, Badania wpływu zmiany parametrów masowo-bezwładnościowych podzespołu suwadła na charakterystyki kinematyczne karabinka standardowego, Mechanik, nr 7/2011, str. 935-942, 2011.
- [8] K. Damaziak, J. Małachowski, P. Płatek, R. Woźniak, Badania wpływu sztywności sprężyny powrotnej suwadła w aspekcie dynamicznej odpowiedzi układu automatyki karabinka standardowego, Mechanik, nr 7/2011, str. 943-950.
- [9] K. Damaziak, J. Małachowski, P. Płatek, R. Woźniak, Badania sztywności materiału zderzaka suwadła w aspekcie dynamicznej odpowiedzi układu automatyki karabinka standardowego MSBS-5,56, Problemy Techniki Uzbrojenia, Zeszyt 117/2011, str. 123-131, Zielonka, 2011.
- [10] J. Gacek, J. Małachowski, P. Płatek, R. Woźniak, Wstępna analiza procesu dynamicznego odziaływania tłoka gazowego z suwadłem dla modułowego systemu broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm, Mechanik, Nr 7/2010 (CD), 2010.
- [11] J. Gacek, M. Pac, Porównawcze badania teoretyczne i doświadczalne wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych węzła gazowego na charakterystyki balistyczne i kinematyczne broni automatycznej, Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Vol. 5, Nr 4 (18), str. 101-114, 2014.
- [12] J. Kijewski, G. Leśnik, Badania doświadczalne i teoretyczne wpływu średnic otworów węzła gazowego na prędkość suwadła broni z odprowadzeniem gazów prochowych, Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Vol. 1, Nr 1 (1), str. 55-68, 2010.

- [13] J. Kijewski, G. Leśnik, Wybrane wyniki badań wpływu średnicy otworu regulacyjnego na pracę mechanizmów broni z odprowadzeniem gazów prochowych, Problemy Techniki Uzbrojenia, Zeszyt 145 nr 1/2018, str. 105-116, 2018.
- [14] G. Leśnik, S. Torecki, Badania doświadczalne i teoretyczne wpływu początkowej objętości komory gazowej na prędkość suwadła broni z odprowadzeniem gazów, Problemy Techniki Uzbrojenia, R. 40, z. 119, str. 91-98, 2011.
- [15] M. Pac, S. Torecki, Działanie mechanizmów broni automatycznej z odprowadzeniem gazów po zatrzymaniu tłoka gazowego, Problemy Techniki Uzbrojenia, R. 40, z. 120, str. 85-92, 2011.
- [16] J. Gacek, G. Leśnik, Badania wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na charakterystyki balistyczne i kinematyczne automatycznej broni strzeleckiej z odprowadzeniem gazów. Część I – Przykładowe wyniki badań teoretycznych, Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Vol. 6, Nr 4 (22), str. 41-54, 2015.
- [17] J. Kijewski, G. Leśnik, M. Pac, Badania teoretyczne i doświadczalne wpływu sztywności sprężyn powrotnych na prędkość suwadła broni z odprowadzeniem gazów, Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Vol. 5, Nr 3 (17) str. 107-118, 2014.
- [18] Z. Surma, S. Torecki, R. Wożniak, Badania symulacyjne jednoczesnego napędu pocisku i suwadła w broni z odprowadzeniem gazów, Biuletyn WAT, Vol. 53, nr 9, str. 5-15, 2004.
- [19] Ł. Szmit, R. Woźniak, M. Zahor, Rozwiązanie konstrukcyjne mechanizmu wyrzucania łusek w modułowym systemie broni strzeleckiej projektu "RAWAT", Problemy Techniki Uzbrojenia, Zeszyt 136 nr 4/2015, str. 79-92, 2015.
- [20] J. Kijewski, M. Pac, Ł. Szmit, R. Woźniak, Badania gabarytowo-masowe oraz parametrów spustu karabinków automatycznych kalibru 5,56 mm, Problemy Techniki Uzbrojenia, Zeszyt 145 nr 1/2018, str. 65-82, 2018.
- [21] G. Leśnik, M. Pac, R. Woźniak, Efekty wykorzystania programu SolidWorks podczas projektowania stanowiska laboratoryjnego do doświadczalnego badania mechanizmów karabinka z odprowadzeniem gazów, Mechanik, R. 84, nr 7(CD), str. 493-500, 2011.
- [22] A. Jęczmyk, M. Pac, S. Torecki, R. Woźniak, Stanowisko laboratoryjne do doświadczalnego badania działania mechanizmów karabinka działającego na zasadzie odprowadzenia gazów, Problemy Techniki Uzbrojenia, Zeszyt 113/2010, str. 71-78.
- [23] G. Leśnik, Z. Surma, S. Torecki, R. Woźniak, Termodynamiczny model działania broni z odprowadzeniem gazów prochowych w okresie napędzania suwadła, Biuletyn WAT, Vol. LVIII, nr 3, str. 193-209, 2009.
- [24] Z. Surma, S. Torecki, R. Woźniak, Model balistyczny układu miotającego z odprowadzeniem gazów prochowych, Biuletyn WAT, Vol. 54, nr 11, str. 43-56, Warszawa, 2005.
- [25] S. Torecki, Z. Surma, R. Woźniak, Napęd suwadła broni automatycznej w powylotowym okresie strzału, Biuletyn WAT, Vol. LV, nr 3, str. 297-309, 2006.
- [26] Z. Surma, Ł. Szmit, S. Torecki, R. Woźniak, Model matematyczny podrzutu broni działającej na zasadzie odprowadzenia gazów, Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Vol. 1, nr 2, str. 51-63, 2010.

- [27] J. Kijewski, Ł. Szmit, Badania teoretyczno-doświadczalne podrzutu automatycznej broni strzeleckiej, Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Vol. 5, nr 4 (18), str. 83-100, 2014.
- [28] J. Kijewski, Ł. Szmit, Badania teoretyczno-doświadczalne odrzutu automatycznej broni strzeleckiej, Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Vol. 4, nr 3 (13), str. 49-66, 2013.
- [29] Ł. Szmit, S. Torecki, Szczegółowy model matematyczny odrzutu swobodnego broni działającej na zasadzie odprowadzenia gazów prochowych, Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Vol. 3, nr 1 (7), str. 37-50, 2012.
- [30] Z. Surma, Ł. Szmit, S. Torecki, R. Woźniak, Niektóre wyniki badań symulacyjnych wpływu charakterystyk konstrukcyjnych karabinka automatycznego na jego odrzut i podrzut, Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Vol. 2, Nr 2, str. 73-84, 2011.
- [31] Ł. Szmit, R. Woźniak, Wykorzystanie komputerowych programów inżynierskich w pracach konstrukcyjnych nad stanowiskiem do badań wybranych charakterystyk broni strzeleckiej, Mechanik, nr 7, płyta CD, 2011.
- [32] Z. Surma, S. Torecki, R. Woźniak, Specyfika odrzutu swobodnego broni z odprowadzeniem gazów prochowych, materiały V Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. "Naukowe aspekty techniki uzbrojenia", Redakcja Wydawnictw WAT, Warszawa, 2004.
- [33] Ł. Szmit, Z. Leciejewski, J. Kijewski, Preliminary theoretical and experimental studies at the recoil and weapon's jump of the automatic firearms, University Review, Vol. 7, No. 4, pp. 38-46, 2013.
- [34] Ł. Szmit, J. Kijewski, Wykorzystanie wyników badań odrzutu i podrzutu automatycznej broni strzeleckiej w procesie doskonalenia karabinków MSBS-5,56, Materiały Konferencyjne XI Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia i Bezpieczeństwa, 2016.
- [35] Z. Surma, S. Torecki, R. Woźniak, Podrzut broni działającej na zasadzie odprowadzenia gazów prochowych, Materiały V Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej, Waplewo, 6-8 października 2004, str. 983-990, 2004.
- [36] D. Goździk, J. Kijewski, P. Kupidura, Ł. Szmit, Wpływ urządzenia wylotowego na skupienie pocisków oraz na podrzut wybranych karabinków modułowego systemu broni strzeleckiej MSBS-5,56, Problemy Techniki Uzbrojenia, Zeszyt 150 nr 2/2019, str. 45-57, 2019.
- [37] L. Szmit, R. Woźniak, Specificity of Design and Action of the Weapon's Jump and Recoil Laboratory Test Stand, Problems of Mechatronics. Armament, aviation, safety engineering, Vol. 3, No 3 (9), pp. 29-39, 2012.
- [38] B. Fikus, Opracowanie i walidacja modelu broni działającej na zasadzie odrzutu zamka swobodnego, rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2018.
- [39] W. Czepukajtis, Oddziaływanie operatora na przemieszczenia lekkich urządzeń mechanicznych, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 1974.
- [40] J. Ewertowski, C. Suchocki, Modeling and numerical simulation of semi-automatic pistol dynamics, Journal of Theoretical and Applied Mechanics 53, 1, pp. 81-91, Warsaw, 2015.

- [41] Z. Idziaszek, M. Jasztal, Model symulacyjny działka lotniczego NR-30, Problemy Techniki Uzbrojenia, Zeszyt 94/2005, str. 203-212, Zielonka, 2005.
- [42] Z. Idziaszek, M. Jasztal, Metodyka badań elementów działka lotniczego z wykorzystaniem systemów CAx, IV Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa, Waplewo, 2002.
- [43] J. Ewertowski, Breech mechanism of a short-recoil weapon with a programmable mass separation, Mechanical Engineering, Vol. LIX, No. 2, str. 231-247, 2012.
- [44] D. Szupieńko, R. Woźniak, Preliminary Physical and Mathematical Model of the Recoil Operated Firearm within the Bolt Recoil Period, Problems of Mechatronics. Armament, aviation, safety engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 59-74, 2021.
- [45] Z. Szkudlarek, Dlaczego H&K zrezygnował z zamka półswobodnego na korzyść tradycyjnego systemu z tłokiem gazowym i z obrotowym trzonem zamkowym?, Przegląd Strzelecki Arsenał, październik 2013, nr 9 (104), 2013.
- [46] J. Ni, X. Wang, Ch. Xu, Virtual test technology study of automatic weapon, World Journal of Modelling and Simulation, Vol. 7, No. 2, pp. 155-160, 2011.
- [47] C. Rodriguez, Mechanical System Simulation of the XM307 Advanced Crew Served Weapon, National Defense Industrial Association Joint Services Small Arms Systems Annual Symposium, conference presentation, 2007.
- [48] P. Shipley, J.B. McConville, The creation of fully functional virtual prototype of an automatic weapon using MSC.Adams, MSC.Software VPD Conference, Huntington Beach, USA, 2006.
- [49] Benelli Armi S.p.A., Developing new customizable armament, MSC.Software Case Study, 2012.
- [50] P.D. Benzkofer, Dynamic analysis of a hand-held weapon, Sixth U.S. Army Symposium on gun dynamics volume I of II, Tamiment, Pennsylvania, USA, 1990.
- [51] P.D. Benzkofer, Dynamic analysis of shoulder-fired weapons, Seventh U.S. Army Symposium on gun dynamics, Newport, Rhode Island, USA, 1993.
- [52] E.A. Binter, M.J. Daniti, Dynamic simulation of legacy weapon system, NDIA Joint Services Small Arms Systems, Annual Symposium, 2006.
- [53] X. Dong, Y. Wang, Ch. Xu, Modeling and simulating of rigid-flexible coupling containing clearance for an assault rifle automatic mechanism, Acta Armamentarii, Vol. 28 No. 9, pp. 1132-1137, China, 2007.
- [54] Y. Zhao, Y. Luo, Y. Qi, Ch. Xu, Modeling and simulation analysis of individual soldier automatic weapon, Journal of Nanjing University of Science and Technology, Vol. 33 No. 6, pp. 774-778, China, 2009.
- [55] J. Ni, Ch. Xu, Y. Wang, Numerical simulation of automatic weapons based on virtual prototype technology, Journal of Nanjing University of Science and Technology Vol. 29 No. 4, pp. 430-445, China, 2005.
- [56] D. Xu, Z. Han, Z. Su, X. Xia, Numerical simulation of some small-caliber gun based on technique of virtual prototype, Journal of Academy of Armored Force Engineering, Vol. 25 No. 4, pp. 47-49, China, 2011.
- [57] J. Ni, Ch. Xu, Y. Wang, Virtual experiment technology study of weapon automatic mechanisms, Journal of System Simulation, Vol. 18 No. 6, pp. 1558-1561, China, 2006.

- [58] J. Ni, Ch. Xu, Z. Hu, Virtual prototype modeling and simulation analysis of machine gun system, Journal of System Simulation Vol. 17 No. 8, pp. 1909-1911, China, 2005.
- [59] D.E. Carlucci, R.M. Dombroski, S.D. Liss, Modeling and simulation as a management tool, National Defense Association Guns and Missiles Conference, conference materials, 2007.
- [60] L.A. Florio, Update on gas flow and heat transfer modeling in small arms system, US Army ADREC conferences publication, USA, 2011.
- [61] L.A. Florio, Finite-volume modeling of system with compressible flow propelled and actuated body motion, Applied Mathematical Modelling, Vol. 33, pp. 3360-3381, 2009.
- [62] D.A. Hopkins, Modeling gun dynamics with three dimensional beam elements, Sixth U.S. Army Symposium on gun dynamics volume I of II, Tamiment, Pennsylvania, USA, 1990.
- [63] D. Ozmen, M. Kurt, B. Ekici, Y. Kaynak, Static, dynamic and fatigue analysis of a semi-automatic gun locking block, Engineering Failure Analysis, Vol. 16, pp. 2235-2244, 2009.
- [64] J. Łazowski, J. Małachowski, T. Niezgoda, Numerical model of bullet barrel system, Journal of KONES, Vol. 14, No. 1, pp. 261-266, 2007.
- [65] J. Łazowski, J. Małachowski, Numeryczne aspekty modelowania układu lufa-pocisk, Przegląd Mechaniczny, nr 6, str. 33-38, 2007.
- [66] J. Łazowski, J. Małachowski, Zagadnienie współpracy pocisku i lufy ujęcie numeryczne, Mechanik, R. 80, nr 11, str. 958-959, 2007.
- [67] J. Łazowski, J. Małachowski, Some selected FEM analyses of motion of a bullet with imperfections while interacting with the barrel, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 15, No. 1, pp. 145-152, 2008.
- [68] J. Łazowski, J. Małachowski, T. Niezgoda, Preliminary concept of numerical modelling of combustion process for gunpowder using LS-DYNA code, Journal of KONES, Vol. 14, No. 1, pp. 255-260, 2007.
- [69] J. Łazowski, J. Małachowski, T. Niezgoda, Wstępna analiza współpracy pocisku i lufy karabinu za pomocą MES, Górnictwo Odkrywkowe, R. 48, nr 7-8, str. 41-43, 2006.
- [70] J. Łazowski, J. Małachowski, T. Niezgoda, Wstępne modelowanie MES współpracy pocisku i lufy karabinu, IX Konferencja Naukowo-Techniczna Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania, Giżycko, 2005.
- [71] J. Łazowski, J. Małachowski, T. Niezgoda, Modelowanie numeryczne współpracy pocisku z lufą, VI Międzynarodowa Konferencja Uzbrojenia Nowe aspekty techniki uzbrojenia, Waplewo, 2006.
- [72] J. Łazowski, J. Małachowski, Analiza stanu wytężenia lufy podczas strzału, Przegląd Mechaniczny, nr 10, str. 26-31, 2008.
- [73] J. South, A. Yiournas, J. Wagner, J. Brown, R. Kaste, A Study of the Engraving of the M855 5.56-mm Projectile, Army Research Laboratory, Aberdeen, 2009.
- [74] S. Deng, H.K. Sun, Ch.J. Chiu, Rifles In-Bore Finite Element Transient Analysis, International Conference on Mechanical, Production and Materials Engineering, Bangkok, pp. 58-62, 2012.

- [75] A. Kowalczyk, W. Stępniak, S. Kaczmarski, Doświadczalno-analityczna metoda wyznaczania oporu przetłaczania pocisku strzeleckiego przez lufę, Problemy Techniki Uzbrojenia, R. 29, z. 75, str. 73-87, 2000.
- [76] S. Cytron, J. Siewert, Rifiling profile push tests: an assessment of bullet engraving forces in various rifling designs, Armament Research, Development and Engineering Center, Picatinny, New Jersey, 2005.
- [77] B. Fikus, P. Płatek, Z. Surma, R. Trębiński, Preliminary numerical and experimental investigations of 9 mm pistol bullet and barrel interaction, Conference: 31st International Symposium on ballistics, Hyderabad, 2019.
- [78] S. Deng, H.K. Sun, Ch.J. Chiu, Transient finite element for in-bore analysis of 9 mm pistols, Applied Mathematical Modelling, Vol. 38, pp. 2673-2688, 2014.
- [79] S. Kochański, Automatyczna broń strzelecka, SIGMA NOT, Warszawa, 1991.
- [80] STANAG 4090, Small Arms Ammunition.
- [81] NO-13-A229, Naboje do broni strzeleckiej 9x19 mm nabój (PARABELLUM NATO) Wymagania, 2005.
- [82] H. Głowacki, Zasady konstrukcji automatycznej broni strzeleckiej, Wydział Wydawniczy WAT, Warszawa, 1987.
- [83] P. Wilniewczyc, Broń samoczynna, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa, 1958.
- [84] Headquaters U.S. Army Material Command, Engineering Design Handbook, Gun series, Automatic weapon, Washington, 1970.
- [85] A. Ciepliński, R. Woźniak, Encyklopedia współczesnej broni palnej, WIS, Warszawa, 1993.
- [86] F. Myatt, Pistolety i rewolwery, Espadon, 2014.
- [87] H. Borchardt, Recoil magazine pistol, Patent No. US571260A, November 10, 1896.
- [88] P. Mauser, Recoil operated firearm, Patent No. 584,479, June 15, 1897.
- [89] J. M. Browning, Firearm, Patent No. US580924A, April 20, 1897.
- [90] J. M. Browning, Firearm, Patent No. US984519A, February 14, 1911.
- [91] https://www.sigsauer.com/firearms/pistols/p320.html, 27.01.2021.
- [92] T. Czyżewski, Metoda układów wieloczłonowych w systemach CAD, Czasopismo Techniczne. Mechanika, R. 108, Z. 7, 4-M, str. 13-20, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2011.
- [93] J. Frączek, M. Wojtyra, Kinematyka Układów Wieloczłonowych metody obliczeniowe, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 2008.
- [94] J. Frączek, M. Wojtyra, Metoda układów wieloczłonowych w dynamice mechanizmów, Ćwiczenia z zastosowaniem programu ADAMS, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2007.
- [95] MSC software, Adams view 2014 help.
- [96] MSC Software, Adams Solver help.
- [97] Function Expressions, University of Rochester, Department of Mechanical Engineering.
- [98] J. Giesbers, Contact mechanics in MSC Adams. A technical evaluation of the contact models in multibody dynamics software MSC Adams, University of Twente, 2012.
- [99] http://xenon.com.pl/pl/itamidy.php, 20.03.2021.

- [100] J. Brodny, Modelowanie tarcia w układach mechanicznych, Górnictwo i Geologia, Tom 5 Zeszyt 2, str. 7-17, 2010.
- [101] U. Fischer i in. (7), Poradnik mechanika, przeł. J. Potrykus i in. (2), REA, str. 41, Warszawa, 2008.
- [102] Z. Bańkowski i in. (24), Mały poradnik mechanika, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, str. 224, Warszawa, 1985.
- [103] https://akro-plastic.com/productfilter/details/7408/, 28.02.2021.
- [104] D. Fuller, Coefficient of Friction, Columbia University.
- [105] G. Rakowski, Z. Kacprzyk, Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- [106] K. Banaś, Wprowadzenie do MES, materiały dydaktyczne Akadami Górniczo-Hutniczej, Kraków, 2020.
- [107] T. Łodygowski, W. Kąkol, Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich, Politechnika Poznańska, Alma Mater, Poznań, 2003.
- [108] https://www.ansyshelp.ansys.com/, 28.12.2020.
- [109] M. Major, J. Różycka, Gumopochodne materiały hipersprężyste omówienie i kryteria praktycznego zastosowania, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo, Z. 17 (167), str. 134-145, 2011.
- [110] B. Fikus, W. Koperski, P. Płatek, Z. Surma, R. Trębiński, Experimental Investigations of Motion of Slide of Selected Pistol Types, Problems of Mechatronics. Armament, aviation, safety engineering, Vol. 7, No 4 (26), pp. 23-32, 2016.
- [111] U.S. Army Aberdeen Test Center, Test Operations Procedure Kinematic Tests of Small Arms, TOP 03-2-826A, Aberdeen Proving Ground, Maryland, USA, 2016.
- [112] Phantom Fastcam Product Summary, Phantom USA, INC.
- [113] Laserowe czujniki przemieszczenia, katalog produktów, Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG.
- [114] Instruction Manual optoNCDT 2300, Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG.
- [115] Cz. Łukianowicz, Przegląd metod oceny struktury geometrycznej powierzchni wyrobów walcowanych, Mechanik, nr 12/2018, str. 1090-1092, 2018.
- [116] R. Morek, Pomiary bezstykowe cz. I, Stal Metale & Nowe Technologie, nr 3-4/2012, str. 48-50, 2012.
- [117] Catalogue Ruag, Pistol and Submachine Gun Ammunition Calibre 9x19.
- [118] https://www.mesko.com.pl/materialy/info/produkty_pliki/181-pdf.pdf, 29.01.2021.
- [119] https://www.sellier-bellot.cz/en/products/pistol-and-revolver-ammunition/pistol-and-revolver-cartridges/detail/289/, 29.01.2021.
- [120] E. Wasilewska, Statystyka opisowa od podstaw, Podręcznik z zadaniami, Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2009.
- [121] https://www.ssusa.org/articles/2018/12/18/everything-you-need-to-know-about-carryoptics-and-red-dots/, 03.10.2020.
- [122] C.I.P. TDCC 9 mm Luger.
- [123] SAAMI Z299.3 2015, Voluntary Industry Performance Standards for Pressure and Velocity of Centerfire Pistol and Revolver Ammunition for the Use of Commercial Manufacturers.

[124] PN-V-01016, Broń strzelecka, Terminologia, 2004.

- [125] P. Badurowicz, W. Stępniak, Oczekiwane cechy konstrukcyjne nowego polskiego pistoletu wojskowego, Problemy Techniki Uzbrojenia, Zeszyt 141 nr 1/2017, str. 95-115, Zielonka, 2017.
- [126] P. Badurowicz, W. Stępniak, Model 9x19 mm pistoletu PW INKA, Problemy Techniki Uzbrojenia, Zeszyt 147 nr 3/2018, str. 93-103, Zielonka, 2018.
- [127] NO-10-A500-2:2008, Broń strzelecka Metody badań Część 2: Badania poligonowe.

[128] Metodyka badań broni strzeleckiej nr 14 WT 0233-Uzbr.

- [129] NO-10-A500-4:2014, Broń strzelecka Metody badań Bezpieczeństwo użytkowania.
- [130] NO-10-A500-6:2000, Broń strzelecka Metody badań Badania działania w warunkach pyłu.
- [131] NO-10-A500-5:2000, Broń strzelecka Metody badań Badania działania w warunkach deszczu.

STRESZCZENIE

Analiza numeryczno-eksperymentalna pistoletu PW INKA działającego na zasadzie krótkiego odrzutu lufy

Celem pracy było opracowanie modelu numerycznego działania broni z krótkim odrzutem lufy wykorzystującego metody: układów wieloczłonowych oraz elementów skończonych. Wyniki tej pracy zostały wykorzystane w konstrukcji pistoletu PW INKA. Po przeprowadzeniu walidacji na podstawie badań eksperymentalnych dla jednego wariantu konstrukcyjnego pistoletu, opracowano wielowariantowy model numeryczny.

Rozdział pierwszy zawiera wstęp do rozprawy: przegląd literatury, opis zasady działania broni z krótkim odrzutem lufy, historię stosowania tej zasady działania, cel i zakres pracy oraz jej genezę. W rozdziale drugim, scharakteryzowano metodę układów wieloczłonowych. Opisano też założenia i warunki początkowo-brzegowe dla zbudowanego modelu oraz przedstawiono i omówiono wyniki badań symulacyjnych. Rozdział trzeci zawiera opis metody elementów skończonych. Posiada również opis zbudowanego modelu oraz wyniki symulacji w postaci charakterystyk kinematycznych oraz naprężeń występujących w konstrukcji. W rozdziale czwartym opisano użytą metodę badawczą i wyniki badań doświadczalnych. Rozdział piąty przedstawia walidację modeli numerycznych na podstawie badań eksperymentalnych. W rozdziale szóstym przedstawiono wybrane zagadnienia analizy parametrycznej dla zaprezentowanego modelu, oceniono wpływ takich parametrów jak: masa zamka, sztywność sprężyny powrotnej, droga odrzutu lufy, opory kurka, opory przerywacza, opory dosyłania naboju z magazynka do komory nabojowej, opór wyrzucania łuski, tarcie między częściami, opory przetłaczania pocisku przez lufę oraz ciśnienie gazów prochowych na charakterystyki kinematyczne rozważanego układu. Rozdział szósty zawiera ponadto opis analizy parametrycznej, przeprowadzonej w celu sprawdzenia wpływu charakterystyk konstrukcyjnych na kinematykę broni. W rozdziale siódmym przedstawiono historię opracowania pistoletu PW INKA oraz idee jego działania. Przedstawiono za pomocą schematycznych rysunków etapy strzału. W ostatnim, ósmym rozdziale podsumowano całość pracy.

ABSTRACT

Numerical and experimental analysis of the short recoil operated PW INKA pistol

The aim of the work was development a numerical model of operation of a short recoil operated weapon using: the multibody systems and the finite elements method. The results of this work were used in the construction of the PW INKA pistol. After validation on the basis of experimental tests for one weapon design variant, a multi-variant numerical model was developed.

The first chapter contains an introduction to the thesis: a review of the literature, a description of the operation cycle of a short recoil operated weapon, the history of the application of this operation system, the purpose and scope of the work and its genesis. In the second chapter, the multibody systems are characterized. The assumptions, initial and boundary conditions for the developed model are also described, as well as the results of simulations are presented and discussed. The third chapter describes the finite element method. It also has a description of the constructed model and simulation results in the form of kinematic characteristics and stress distribution on the structure. The fourth chapter describes the used research method and the results of experimental tests. The fifth chapter presents the validation of numerical models based on experimental tests. In the sixth chapter, selected problems of parametric analysis for the presented model were shown, the impact of such parameters as: slide mass, recoil spring stiffness, barrel recoil length, hammer resistance, disconnector resistance, resistance of feeding and chambering of the next cartridge, resistance of extraction and ejection of case, friction between parts, resistance of the bullet engraving into the barrel and propellant gas pressure on the kinematic characteristics of the under consideration system. The sixth chapter also contains a description of the parametric analysis carried out in order to check impact of the design characteristics on the weapon kinematics. Chapter seven presents the history of the PW INKA pistol development and the idea of its operation cycle. The stages of the shot are shown by means of schematic drawings. In the last, eighth chapter, the entire work is summarized.