



Odrzut hamowany w obiekcie specjalnym kalibru 7,62 mm z tłumikiem magnetoreologicznym TR-1.0M*

Marcin BAJKOWSKI, Michał KUCHARCZYK,
Roman GRYGORUK, Marek RADOMSKI

*Instytut Mechaniki i Poligrafii, Politechnika Warszawska
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa*

Streszczenie. Przedmiotem pracy jest próba poznania wpływu wprowadzenia do układu broń ramienna – strzelec, systemu programowania przebiegu zjawiska odrzutu poprzez zastosowanie sterowanego tłumika magnetoreologicznego (MR). Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych układu broń – strzelec, wyposażonego w prototyp tłumika TR-1.0M. Opracowano model reologiczny układu i wyprowadzono opisujący go układ równań ruchu. Oszacowano zakres prądów sterowania struktury magnetoreologicznej oraz dobrano wielkość szczeliny w amortyzatorze. Otrzymane wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych dowodzą, że zaproponowana modyfikacja układu broń ramienna – strzelec wpływa korzystnie między innymi na jego stabilność, a co za tym idzie – celność oraz zwiększa komfort strzelca, szczególnie podczas prowadzenia ognia seryjnego.

Słowa kluczowe: mechanika, dyssypacja, magnetoreologia, odrzut

1. WSTĘP

Z historycznego punktu widzenia przegląd rozwoju konstrukcji automatycznych lub półautomatycznych broni ramiennych, niezależnie od systemów uruchamiania ich mechanizmów, wyraźnie pokazuje, iż obok głównych cech eksploatacyjnych, takich jak niezawodność i szybkość działania,

* Artykuł został opracowany na podstawie referatu prezentowanego podczas IX Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk, 25-28 września 2012 r.

trudnym do rozwiązania zadaniem jest zapewnienie optymalnych wartości wielkości charakteryzujących zjawisko odrzutu, takich jak energia odrzutu i siła odrzutu. Wymienione wielkości mają niezwykle istotny wpływ na celność broni oraz na komfort strzelca [1-3]. Czynniki mającymi bezpośredni wpływ na celność są między innymi:

- typ i charakterystyka urządzeń celowniczych [4],
- parametry dynamiczne związane z cechami konstrukcyjnymi elementów mechanicznych [5],
- parametry wzajemnego oddziaływania, w tym tłumienia, w układzie broń – strzelec [6].

Niniejsze opracowanie omawia próbę poznania wpływu wprowadzenia do układu broń – strzelec, systemu programowania zjawiska odrzutu poprzez zastosowanie sterowanego tłumika magnetoreologicznego (MR) [10, 12]. Poddawana analizie modyfikacja wpływa między innymi na przebieg zjawiska odrzutu i związaną z nim utratę stabilności układu broń – strzelec, w odniesieniu do utrzymania stałości naprowadzania broni na cel. W literaturze przedmiotu nie znaleziono wyników badań ukazujących zastosowania tego typu metod tłumienia drgań i minimalizacji przemieszczenia broni ramiennej do poprawy jej skuteczności. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, iż dotychczasowe prace dotyczące efektywności działania tłumików magnetoreologicznych nie podejmują też tematu wysokoenergetycznego wymuszenia impulsowego w układach typu broń – strzelec, a znane publikacje dotyczą głównie tematyki tłumienia drgań obiektów specjalnych, które umieszczone są na podstawach – patrz m.in. prace [8, 13].

2. ANALIZA PROBLEMU

Wysokoenergetyczne wymuszenia impulsowe, jakim poddawane są tłumiki MR w układzie broń – strzelec, z punktu widzenia cech dynamicznych posiadają bardzo specyficzne własności. Charakteryzują się one przede wszystkim niestabilizowanym i niepowtarzalnym ruchem układu następującym po strzale [8]. Nieosiągalne, z punktu widzenia skuteczności działania broni, jest uzyskanie trafień w serii, w jeden punkt. Wynika to ze współlistnienia w układzie broń – strzelec wielu czynników. Jednym z kluczowych jest obserwowane po każdym strzale zjawisko odrzutu, związane z przemieszczeniami różnych elementów składowych broni oraz oddziaływaniem reakcji dynamicznej wpływających z lufy gazów prochowych, po wylocie z niej pocisku. Aktualnie stosowane rozwiązania uniemożliwiają eliminację ruchomych części układu. Dążenie do zwiększania stabilności układu może być dokonywane na wielu płaszczyznach. Zjawisko zwiększania celności należy więc do grupy zadań z zakresu polioptymalizacji wielokryterialnej.

Z inżynierskiego punktu widzenia, dążenie do doskonałości obiektu specjalnego musi nastąpić już na etapie wstępnych prac projektowych oraz prac badawczo-eksploatacyjnych. Programowanie przebiegu zjawiska odrzutu, w aktualnie produkowanych konstrukcjach, sprowadza się do stosowania i doboru dodatkowych niesterowanych elementów sprężystych i tłumiących mających za zadanie zmianę dynamicznego oddziaływania obiektu na strzelca.

W związku z pojawieniem się nowych materiałów oraz zaawansowanych technologii, a zwłaszcza z możliwościami wykorzystania materiałów należących do grupy tzw. „smart materials”, słuszne wydaje się wykorzystanie ich do poprawy parametrów eksploatacyjnych omawianych układów [21, 22]. W grupie materiałów będących przedmiotem zainteresowania są ciecze magnetoreologiczne [25, 26], które wobec możliwości łatwej zmiany swoich właściwości i parametrów, za pomocą wartości natężenia prądu sterowania, otwierają nowe możliwości optymalizacji zjawiska odrzutu.

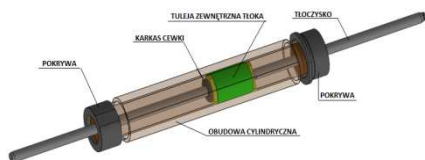
Propozycja zastosowania sterowanego tłumika magnetoreologicznego pozwala na dostosowywanie obiektu do zmiennych obciążeń i związanych z nimi przemieszczeń. Sterowanie wielkościami rozpraszania i pochłaniania energii pozwala nie tylko minimalizować wpływające na celność strzału amunicją strzelecką zjawisko odrzutu, ale również znacząco wpływać na poprawę komfortu strzelca przy realizacji strzelań z użyciem granatów nasadkowych, czy z granatników podwieszanych. Prawidłowe rozwiązanie problemów związanych ze sterowaniem i adaptacją urządzeń opartych na tłumikach MR może skutecznie wpłynąć na poprawę własności eksploatacyjnych broni ramiennej strzeleckiej. Zaprezentowane w dalszej części opracowania wyniki badań i analiz jednoznacznie udowadniają, iż poprzez zastosowanie urządzenia wykorzystującego materiały „inteligentne” w dynamicznej strukturze układu broń – strzelec i odpowiedniego sterowania ich właściwościami, możliwe jest uzyskanie wartości finalnych przemieszczeń elementów układu, które zarówno z punktu widzenia eksploatacyjnego, jak i matematycznego zapewnią możliwie optymalne wartości wielkości charakteryzujących odrzut broni, zarówno podczas strzelania amunicją strzelecką ogniem pojedynczym, jak i ogniem seryjnym, czy też w przypadku strzelania granatami.

Wpływ zastosowania tłumika MR na ramienną broń strzelecką zbadano na przykładzie karabinka samoczynno-samopowtarzalnego AKMS kalibru 7,62 mm. Podjęte badania obejmowały konstrukcję i budowę odpowiedniego stanowiska pomiarowego, opracowanie modelu fizycznego i matematycznego, a także analizę wpływu parametrów tłumika MR na właściwości eksploatacyjne układu broń – strzelec.

3. BADANIE EKSPERYMENTALNE

3.1. Opis stanowiska badawczego

Na potrzeby realizacji badań eksperymentalnych wykonano prototyp tłumika magnetoreologicznego TR-1.0M (rys. 1, fot. 1) wykorzystującego ciecz MRF-132DG firmy LORD [17, 25, 26].



Rys. 1. Schemat konstrukcyjny

Fig. 1. Schematic design



Fot. 1. Fotografia tłumika TR-1.0M

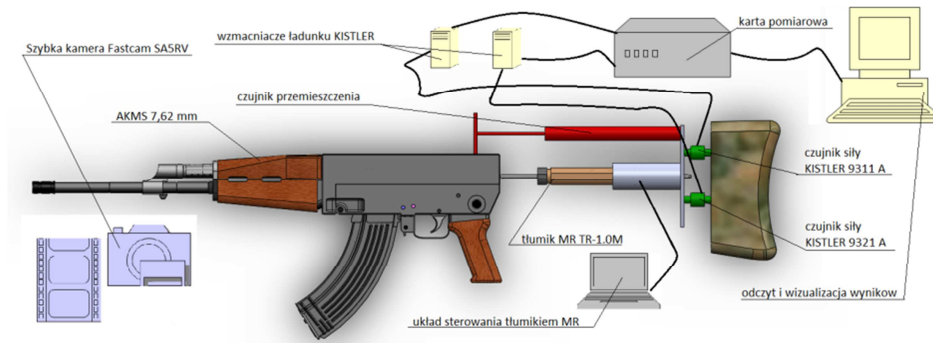
Photo 1. Manufactured TR-1.0M damper

Po zaadaptowaniu tłumika MR do układu broń – strzelec, został on poddany wszechstronnym badaniom laboratoryjnym, które pozwoliły na ocenę efektywności jego działania, a także na zweryfikowanie poprawności wykonanej konstrukcji prototypu. Po wykonaniu próbnych strzelań uznano, iż wykonany i udoskonalony prototyp tłumika spełnił wszystkie stawiane założenia wstępne. Obok prac konstrukcyjnych i warsztatowych, dokonano wielu badań aplikacyjnych, które pozwoliły na wstępne oszacowanie zakresu prądów użytkowych sterowania tłumikiem przy zadanych obciążeniach. W testach tłumika uwzględniono zarówno strzelanie z broni ramiennej (z amunicji strzeleckiej), jak i prowadzenie ognia z użyciem granatów nasadkowych [24].

Na strzelnicy laboratoryjnej wykonane zostały pomiary siły pchnięcia działającej na strzelca przy różnych wartościach natężenia prądu sterowania tłumikiem. Podczas realizacji wyżej wymienionych pomiarów użyte zostały: zmodyfikowana stopka kolby wyposażona w dwa czujniki siły (KISTLER 9311A, 9321A), czujnik przemieszczenia tłocyska tłumika, bramki chwili wyjścia oraz kamera Fastcam SA5RV o prędkości filmowania 1 000 000 klatek na sekundę (ang. Fps). Stanowisko badawcze (rys. 2) składało się z: karabinka samoczynnego AKMS kaliber 7,62 mm, wyposażonego w tłumik MR oraz stopkę kolby z zamontowanymi czujnikami siły, wzmacniaczy ładunku oraz karty pomiarowej z systemem odczytu i wizualizacji wyników.

Podczas realizacji wstępnej fazy badawczej podjęto decyzję o uzupełnieniu stanowiska o dodatkowe urządzenie pomiaru chwili wyjścia pocisku z lufy.

Uzyskanie precyzyjnego pomiaru chwili wyjścia pocisku dało możliwość zestawienia wyników pomiarów dla poszczególnych strzałów na wykresach porównawczych do wspólnego układu odniesienia. Badania przeprowadzono, strzelając ogniem pojedynczym i ciągłym (seria 3 strzałów).



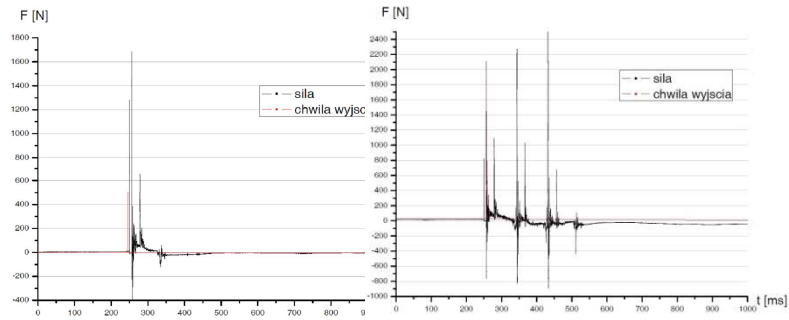
Rys. 2. Schemat poglądowy stanowiska badawczego

Fig. 2. Diagram of the laboratory stand

3.2. Prezentacja wyników badań eksperymentalnych

3.2.1. Strzały pojedyncze oraz trzy strzały w serii z karabinka bez tłumika MR

Pierwsza faza badań eksperymentalnych polegała na określeniu cech dynamicznych karabinka AKMS. Pozwoliła ona na identyfikację wielkości siły pchnięcia działającej na strzelca, podczas strzału z podparciem na ramieniu przy wykorzystaniu standardowej kolby sztywnej bez tłumika MR. Zrealizowano ją dla przypadków strzału pojedynczego i trzech strzałów w serii (rys. 3 i 4).



Rys. 3. Przebieg siły pchnięcia przy strzale pojedynczym z uwzględnieniem chwili wyjścia pocisku

Fig. 3. Thrust force for single shot mode, with marked moment of projectile exit

Rys. 4. Przebieg siły pchnięcia przy trzech strzałach w serii z uwzględnieniem chwili wyjścia pierwszego pocisku

Fig. 4. Thrust force for series for burst mode shooting, with marked moment of first projectile exit

3.2.2. Strzały pojedyncze oraz trzy strzały w serii z karabinka wyposażonego w tłumik MR

Przeprowadzone modelowanie, opis matematyczny oraz symulacje numeryczne pozwoliły na określenie granicznych wartości zmienności natężenia prądu sterowania, jaki należy stosować dla badanego tłumika TR-1.0M. Przedział ten wynosi: 0,00-0,50 A. Z tego zakresu wybrano wartości prądu sterowania, które brane były pod uwagę w dalszych badaniach podczas strzałów pojedynczych (tab. 1) oraz serii trzech strzałów (tab. 2).

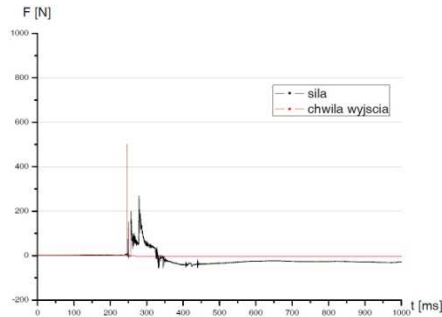
Tabela 1. Zestawienie charakterystycznych wartości maksymalnej siły pchnięcia dla strzałów pojedynczych

Table 1. Typical values of maximum thrust force for single shot mode

Lp.	Prąd sterowania [A]	Maksymalna wartość siły pchnięcia [N]	Prędkość pocisku [m/s]
1	0,00	267	727
2	0,05	397	726
3	0,10	266	719
4	0,15	602	723
5	0,25	457	720
6	0,50	704	726

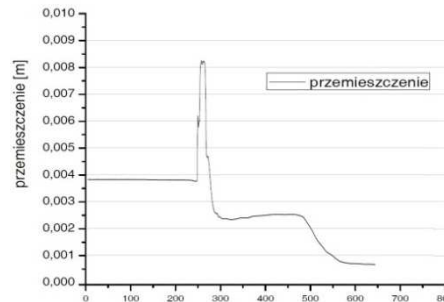
Na rysunkach 5-16 zamieszczone zostały przykładowe wyniki badań, jakie otrzymano w przypadku strzelania strzałami pojedynczymi, gdy wartości natężenia prądu sterowania tłumikiem MR wynosiły od 0,00 A do 0,50 A.

Zestawienie wyników badań dotyczące zmian wartości siły pchnięcia w funkcji czasu, jakie otrzymano w przypadku strzałów pojedynczych, przy wszystkich wartościach natężenia prądu sterowania, jakie były zadawane podczas eksperymentu zilustrowano na rysunku 17.



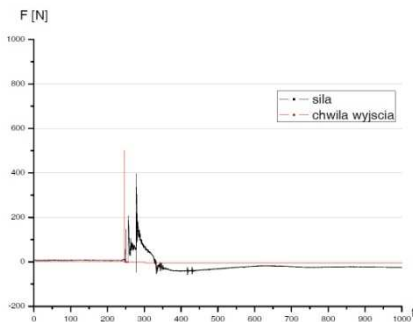
Rys. 5. Wykres siły pchnięcia w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,00 A dla strzału pojedynczego

Fig. 5. Thrust force history for 0,00 A current obtained for single shot mode



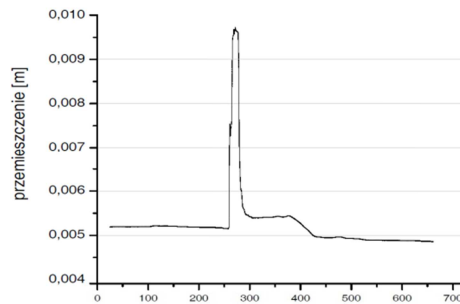
Rys. 6. Wykres przemieszczenia tłoczyska w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,00 A dla strzału pojedynczego

Fig. 6. History of displacement of the damper's rod for 0,00 A current, obtained for single shot mode



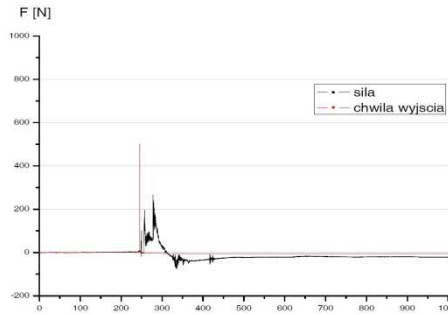
Rys. 7. Wykres siły pchnięcia w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,05 A dla strzału pojedynczego

Fig. 7. Thrust force history for 0,05 A current obtained for single shot mode



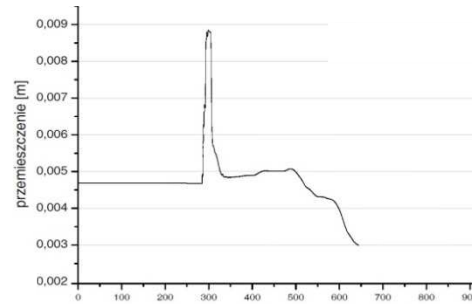
Rys. 8. Wykres przemieszczenia tłoczyska w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,05 A dla strzału pojedynczego

Fig. 8. History of displacement of the damper's rod for 0,05 A current, obtained for single shot mode



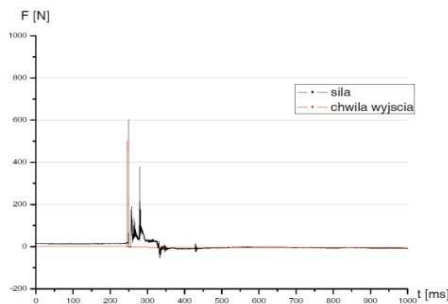
Rys. 9. Wykres siły pchnięcia w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,10 A dla strzału pojedynczego

Fig. 9. Thrust force history for 0,10 A current obtained for single shot mode



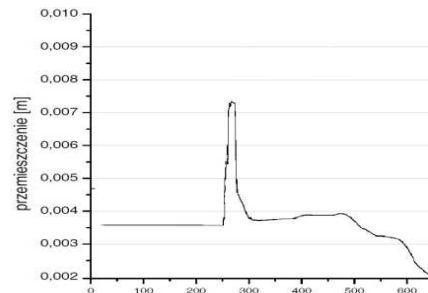
Rys. 10. Wykres przemieszczenia tłoczyska w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,10 A dla strzału pojedynczego

Fig. 10. History of displacement of the damper's rod for 0,10 A current, obtained for single shot mode



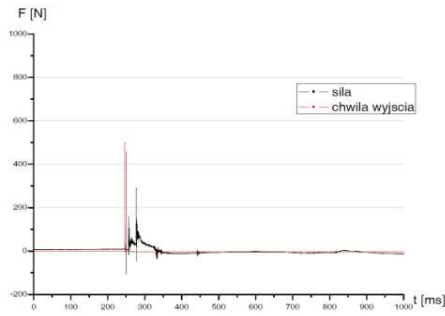
Rys. 11. Wykres siły pchnięcia w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,15 A dla strzału pojedynczego

Fig. 11. Thrust force history for 0,15 A current obtained for single shot mode



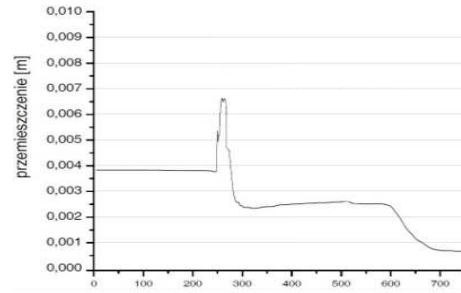
Rys. 12. Wykres przemieszczenia tłoczyska w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,15 A dla strzału pojedynczego

Fig. 12. History of displacement of the damper's rod for 0,15 A current, obtained for single shot mode



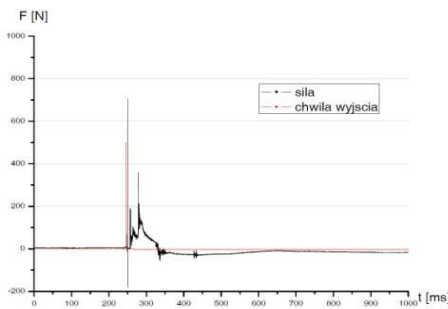
Rys. 13. Wykres siły pchnięcia w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,25 A dla strzału pojedynczego

Fig. 13. Thrust force history for 0,25 A current obtained for single shot mode



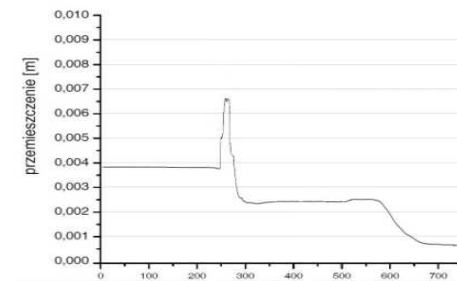
Rys. 14. Wykres przemieszczenia tłoczyska w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,25 A dla strzału pojedynczego

Fig. 14. History of displacement of the damper's rod for 0,25 A current, obtained for single shot mode



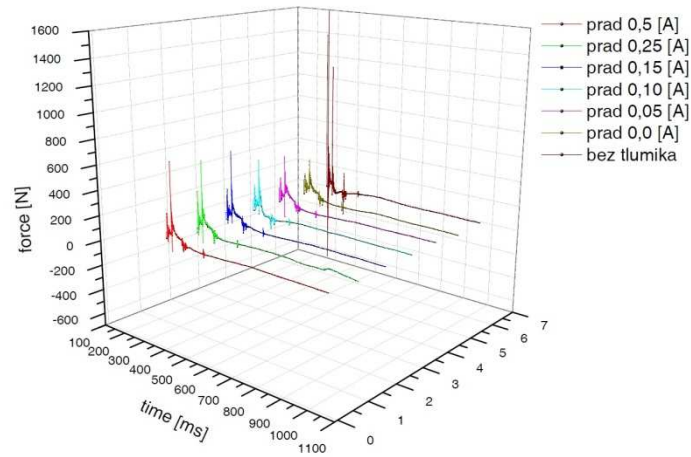
Rys. 15. Wykres siły pchnięcia w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,50 A dla strzału pojedynczego

Fig. 15. Thrust force history for 0,50 A current obtained for single shot mode



Rys. 16. Wykres przemieszczenia tłoczyska w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,50 A dla strzału pojedynczego

Fig. 16. History of displacement of the damper's rod for 0,50 A current, obtained for single shot mode



Rys. 17. Zestawieniowy wykres siły pchnięcia w funkcji czasu dla strzałów pojedynczych

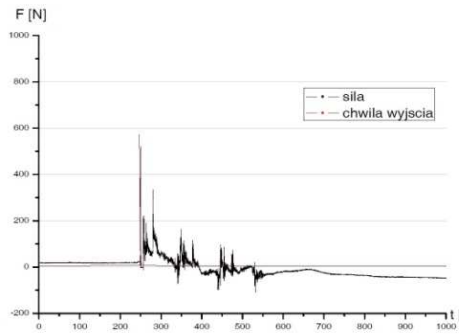
Fig. 17. Comparison of thrust force history for single shot mode

Tabela 2. Zestawienie charakterystycznych wartości maksymalnej siły pchnięcia dla trzech strzałów w serii

Table 2. Comparison of thrust force history for 3-round burst mode

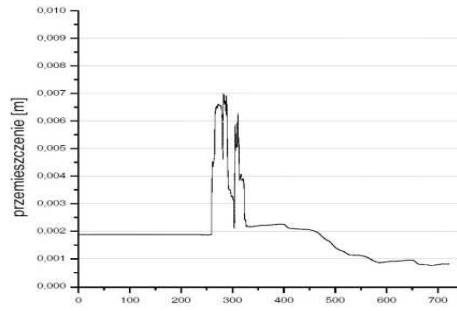
Lp.	Prąd sterowania [A]	Maksymalna wartość siły pchnięcia [N]	V pocisku [m/s]
1	0,0	512	723
2	0,1	514	726

Wyniki badań dotyczące reakcji układu na strzelanie serią złożoną z trzech strzałów zostały zaprezentowane na rysunkach 18-21.



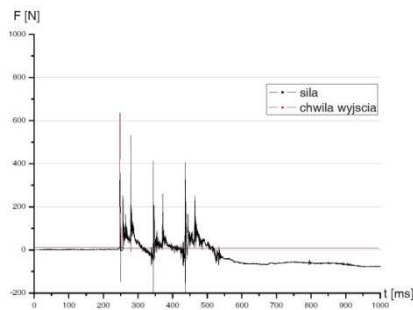
Rys. 18. Wykres siły pchnięcia w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,0 A dla trzech strzałów w serii

Fig. 18. Thrust force history for 0,0 A for 3-round burst mode



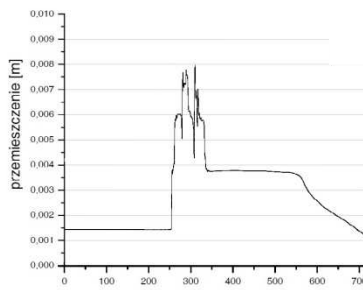
Rys. 19. Wykres przemieszczenia tłoczyska w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,0 A dla trzech strzałów w serii

Fig. 19. History of displacement of the damper's rod for 0,10 A current, obtained for 3-round burst mode



Rys. 20. Wykres siły pchnięcia w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,10 A dla trzech strzałów w serii

Fig. 20. Thrust force history for 0,10 A for 3-round burst mode



Rys. 21. Wykres przemieszczenia tłoczyska w funkcji czasu przy prądzie sterowania 0,10 A dla trzech strzałów w serii

Fig. 21. History of displacement of the damper's rod for 0,10 A current, obtained for 3-round burst mode

Analiza zaprezentowanych przebiegów siły pchnięcia oraz przemieszczeń tłoczyska tłumika MR w funkcji czasu, a także zarejestrowanych przebiegów siły pchnięcia bez użycia tłumika MR uprawnia do stwierdzenia, że istnieje wyraźna zależność między wartością prądu sterującego a wielkością siły pchnięcia, od 267 N dla prądu 0 A do 704 N przy prądzie 0,5 A, a nawet 1700 N dla kolby bez tłumika. Dowodzi to, iż zastosowanie tłumika magnetoreologicznego pozwala zmniejszyć siłę pchnięcia.

W każdym z przypadków strzałów pojedynczych, maksimum siły pchnięcia (patrz też rys. 17) i maksymalne wartości przemieszczenia tłoczyska, pojawiają się po zarejestrowanej chwili wyjścia pocisku, a więc wówczas, gdy pocisk opuścił przewód lufy. W przypadku ognia seryjnego, taką sytuację obserwowano jedynie dla pierwszego strzału w serii, bowiem podczas eksperymentu tylko pierwszy pocisk wyzwalał bramkę chwili wyjścia. Minimalizacja siły pchnięcia nie ma więc istotnego wpływu na celność w przypadku strzelania ogniem pojedynczym i dla pierwszego strzału w serii, natomiast niewątpliwie wpływa ona na komfort pracy strzelca, szczególnie w przypadku długotrwałego prowadzenia ognia w warunkach bojowych.

Łatwo zauważyć, że przemieszczenie tłoczyska tłumika wpływa bezpośrednio na geometrię broni, powodując skracanie kolby po każdym strzale. W tym przypadku może to także powodować dyskomfort pracy strzelca, zmuszonego do dostosowywania się do „dynamicznie” zmieniających się wymiarów broni.

4. MODEL REOLOGICZNY UKŁADU BROŃ – STRZELEC WYPOSAŻONEGO W TŁUMIK MAGNETOREOLOGICZNY

Na potrzeby wstępnego szacowania zakresu prądów sterowania tłumika wykonano wieloetapowy proces modelowania układu broń – strzelec.

Pierwszym z etapów było stworzenie ogólnej struktury fizycznej analizowanego układu [20, 23, 24]. Drugim – opracowanie jego modelu matematyczno-dynamicznego, możliwie wiernie odwzorowującego wszystkie ważne cechy i elementy konstrukcyjne oraz warunki eksploatacyjne. W zbudowanym modelu zaproponowano wykorzystanie, do procesu pochłaniania i rozpraszania energii, amortyzatora magnetoreologicznego jako urządzenia o niezdefiniowanych dokładnie właściwościach [11, 19].

W kolejnym etapie pracy, po przeprowadzeniu wszechstronnych badań tłumika TR-1.0M i zaproponowaniu jego struktury reologicznej [7, 9, 18], przedstawiono ostateczną wersję modelu obiektu (rys. 22) jako nadającą się do końcowej analizy ruchu badanego urządzenia wyposażonego w tłumik MR.

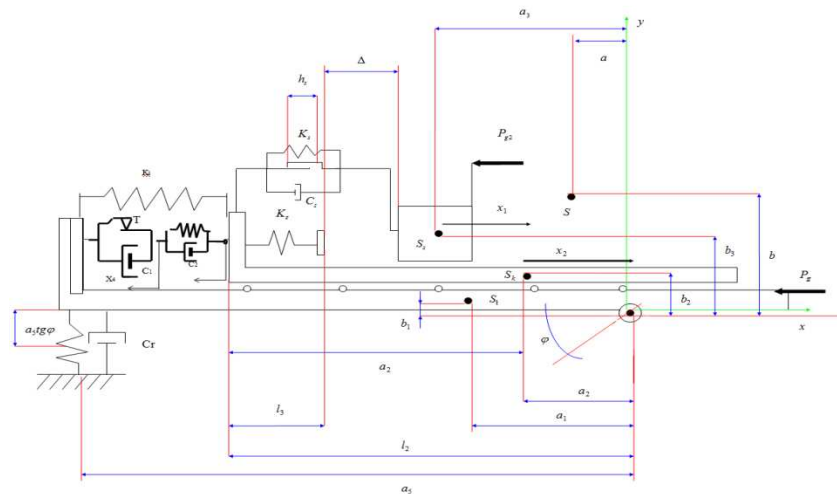
W tej problematyce badawczej każdy z etapów wymagał sformułowania dodatkowych zadań badawczych, które następnie były kolejno rozwiązywane. Z uwagi na ograniczenie problematyki pracy, nie przedstawia się pełnej prezentacji analitycznych rozważań omawianych zagadnień.

W procesie formułowania różniczkowych równań ruchu analizowanego obiektu, wykorzystano równania Lagrange’a II rodzaju; oznaczenia zostały zestawione w tablicy 3.

Tabela 3. Ważniejsze oznaczenia użyte w procesie formułowania równań ruchu

Table 3. Denotations for the motion equation

MR	magnetoreologiczny	$k_i, k_a, k_b,$ k_c, k_s, k_z	współczynniki sztywności [N m ⁻¹]
(i = 1,2,...)	wskaźniki	m, m_k, m_l $m_z,$	masy elementów obiektu i modelu [kg]
a_i, b_i	współrzędne liniowe [m]	P, P_g, P_{g2}	siła gazowa, powrotna gazowa [N]
G	moduł sprężystości postaciowej [N m ⁻²]	$c, c_o, c_i,$ $i = 1,2,...n$	wsp. tłumienia wiskotycznego [Ns m ⁻¹]
D, D_i	funkcja dyssypacji	$S, S_l, S_z,$ S_m	środki ciężkości elementów obiektu
$E, E_k, V_p,$ E_g	energia [J] [kg s ⁻² m]	T, T_o	siła tarcia [N]
F, F_i	siły [N]	$V, V_k, V_s,$ v, v_k, v_s	prędkości liniowe elementów [ms ⁻¹]
ΔR	wielkość szczeliny [m]	x_i, y_i, z_i	współrzędne kartezjańskie [m]
g	przysp. ziemskie [m s ⁻²]	φ	kąt obrotu [deg]
H, h_s	wysokość [m]	Δ	skok ogranicznika przemieszczeń [m]
I, i	natężenie prądu [A]	ω	prędkość obrotowa [s ⁻¹]
$k_i, k_a, k_b,$ k_c, k_s, k_z	wsp. sztywności [N m ⁻¹]	τ	wskaźnik zbioru siły tarcia



Rys. 22. Model reologiczny układu broń – strzelec, wyposażonego w tłumik magnetoreologiczny

Fig. 22. Rheological model of the rifle-shooter system, with magnetorheological damper

Prezentowane człony tych wyrażeń były wykorzystywane do różniczkowego opisu ruchu, w każdym z kolejnych rozpatrywanych przypadków, analizowanych modeli, prowadząc do końcowej postaci równań:

– energii kinetycznej

$$E_k = \frac{1}{2}\dot{\varphi}^2(I_1 + I_2 + I_3) + \frac{m_k \dot{x}_2^2}{2} + m_k \dot{x}_2 b_2 \dot{\varphi} + \frac{m_k b_2^2 \dot{\varphi}^2}{2} + \frac{m_k \dot{\varphi}^2 a_2^2}{2} - m_k \dot{\varphi}^2 a_2 x_2 + \frac{m_k \dot{\varphi}^2 x_2^2}{2} + \frac{m_s \dot{x}_1^2}{2} + m_s \dot{x}_1 b_3 \dot{\varphi} + \frac{m_s b_3^2 \dot{\varphi}^2}{2} + \frac{m_s a_s^2 \dot{\varphi}^2}{2} - m_s x_1 a_s \dot{\varphi}^2 + \frac{m_s \dot{\varphi}^2 a_s^2}{2} \quad (1)$$

– energii potencjalnej

$$V_{E_p} = g\varphi(m_1 a_1 + m_k a_2 + m_s a_s) + \frac{1}{2}k_r a_5^2 \varphi^2 + \frac{1}{2}x_2^2 K_l + \frac{1}{2}k_s(x_1 - x_2)^2 + \frac{1}{2}\mathfrak{k}_z(x_1 + \Delta - x_2)^2 + \frac{1}{2}k_l(x_4 - x_2)^2 - g\varphi(m_1 a_1 + m_k(a_2 - x_2) + m_s(a_s - x_1)) = \frac{1}{2}k_r a_5^2 \varphi^2 + \frac{1}{2}x_2^2 K_l + \frac{1}{2}k_s(x_1 - x_2)^2 + \frac{1}{2}\mathfrak{k}_z(x_1 + \Delta - x_2)^2 + \frac{1}{2}k_l(x_4 - x_2)^2 - g\varphi(m_k x_2 + m_s x_1) \quad (2)$$

– dyssypacji energii

$$D_{E_d} = \frac{1}{2}C_s(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 + \frac{1}{2}C_1 \dot{x}_4^2 + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_4)^2 + \frac{1}{2}C_r a_5^2 \dot{\varphi}^2 \quad (3)$$

Uporządkowana postać równań ruchu opracowanego modelu dynamicznego, badanego obiektu specjalnego, uwzględniająca zaproponowany reologiczny model prototypu tłumika TR-1.0M, przyjmuje następującą postać:

$$\ddot{\varphi}(I_1 + I_2 + I_3) + m_k(\ddot{x}_2 b_2 + \ddot{\varphi}(b_2^2 + (a_2 - x_2)^2) - 2\dot{x}_2 \dot{\varphi}(a_2 + x_2)) + m_s(\ddot{x}_1 b_3 + \ddot{\varphi}(b_3^2 + (a_3 - x_1)^2) - 2\dot{x}_1 \dot{\varphi}(a_3 + x_1)) - k_r a_5^2 \dot{\varphi} + g\varphi(m_k x_2 - m_s x_1) + C_r a_5^2 \dot{\varphi} = P_g b_l + P_{g2} b_2 \quad (4)$$

$$\ddot{\varphi} \left\{ [b_2^2 + (a_2 - x_2)^2] m_k + [b_3^2 + (a_3 - x_1)^2] m_s + (I_1 + I_2 + I_3) \right\} + \ddot{x}_1 b_3 m_s + \ddot{x}_2 b_2 m_k - \dot{\varphi} [2\dot{x}_2 m_k (a_2 + x_2) + 2\dot{x}_1 m_s (a_3 + x_1) - C_r a_5^2] + -\varphi [k_r a_5^2 \dot{\varphi} + g\varphi(m_k x_2 - m_s x_1)] = P_g b_l + P_{g2} b_2 \quad (4a)$$

$$m_s(\ddot{x}_1 + b_3 \ddot{\varphi}) + k_s(x_1 - x_2) + \mathfrak{k}_z(x_1 + \Delta - 1) - g\varphi m_s + C_s(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = P_{g2} \quad (5)$$

$$\ddot{\varphi} b_3 m_s + \ddot{x}_1 m_s + \dot{x}_1 C_s - \dot{x}_2 C_s - \varphi g m_s + x_1(k_s + \mathfrak{k}_z) - x_2 k_s + \mathfrak{k}_z(\Delta - 1) = P_{g2} \quad (5a)$$

$$m_k(\ddot{x}_2 + b_2\ddot{\varphi}) + K_l x_2 - k_s(x_2 - x_1) + k_l(x_2 - x_4) + \mathcal{K}_z x_2 - g\varphi m_k + C_s(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_4) = P_g \quad (6)$$

$$\ddot{\varphi} b_2 m_k + \ddot{x}_2 m_k - \dot{x}_1 C_s + \dot{x}_2(C_s + C_2) - x_4 C_2 - \varphi g m_k + x_1 k_s + x_2(K_l - k_s + k_l + \mathcal{K}_z) - x_4 k_l = P_g \quad (6a)$$

$$k_l(x_4 - x_2) + C_1 \dot{x}_4 + C_2(\dot{x}_4 - \dot{x}_2) = 0 \quad (7)$$

$$\dot{x}_2 C_2 - \dot{x}_4(C_1 + C_2) + x_2 k_l - x_4 k_l = 0 \quad (7a)$$

Formułując równania, założono, że wprowadzie analiza dynamiczna modelu dotyczyć będzie wybranego obiektu, ale będzie ona tak prowadzona, aby opracowany model był również przydatny do analizy obiektów o budowie zbliżonej do analizowanego, a więc, aby stał się wzorcem do podobnych analiz dotyczących całych grup obiektów, które spełniają odpowiednie kryteria klasyfikacyjne pozwalające sytuować i zaliczać je do wybranych pozycji algorytmów klasyfikacyjnych broni strzeleckiej. Analizowany fizyczny obiekt specjalny i jego struktura pozwalają w prosty sposób modyfikować lub eliminować kolejne, mniej lub bardziej istotne, z punktu widzenia cech dynamicznych modelu, elementy, węzły konstrukcyjne lub charakterystyki. Dzięki temu, bez większego trudu, mogą być sformułowane nowe właściwości obiektu należącego do podobnej grupy klasyfikacyjnej broni. Zgromadzony materiał badawczy [14-16], dotyczący tłumików magnetoreologicznych, stwarza projektantowi znaczne możliwości wyboru najbardziej interesujących cech, które przypisane są tym strukturom.

Bardzo ważne są również cechy konstrukcji przedstawionych równań ruchu, tak aby możliwe było łatwe wprowadzanie do nich zmian parametrów charakteryzujących badany obiekt.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Zaprezentowane rezultaty badań jednoznacznie pokazują, iż zastosowanie w układzie kolby karabinka AKMS kalibru 7,62 mm, sterowanego tłumika magnetoreologicznego może w istotny sposób wpływać na zmniejszenie wartości siły pchnięcia oddziałującej na strzelca; pozwala również ograniczać przemieszczenie ruchomego elementu kolby.

To stwierdzenie dotyczy obu badanych przypadków układów broń – strzelec, tzn. podczas strzelania ogniem pojedynczym i ciągłym.

W opinii autorów na obecnym etapie prowadzonych prac badawczych możliwe jest sformułowanie i rozwiązanie kilku zadań optymalizacyjnych, które doprowadzą do wyznaczenia takich przebiegów prądu sterującego własnościami cieczy magnetoreologicznej, które zapewnią akceptowalny i najlepszy, z eksploatacyjnego punktu widzenia, przebieg siły pchnięcia przy jednocześnie najmniejszym skróceniu kolby użytej w broni oraz jak najszybszy powrót tłoczyska tłumika do położenia pierwotnego.

*Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej ze środków NCN
jako grant badawczy nr N N501 231139.*

LITERATURA

- [1] Błagonrawow A.A., *Osnowanija projektowanija awtomaticzeskogo oruzija*, Gos. Izdat. Obronnoj Promyslennosti, 1940.
- [2] Kochański S., *Odrzut hamowany ramiennej broni strzeleckiej*, PW IBSM, Warszawa, 1979.
- [3] Ministere De La Guerre, *Instruction pour les unites de mitrailleuse d'infanterie*, Ed. Berger-Levrault, 1933.
- [4] Stetkiewicz W., *Podstawy teoretyczne konstrukcji broni palnej*, GIM, Warszawa, 1951.
- [5] Wilniewicz P., *Właściwości i rozwój broni samoczynnych*, PWN, Warszawa, 1958.
- [6] Krzysztofik I., *Analiza oddziaływania broni i strzelca: lekkich rakiet lotniczych i broni strzeleckiej*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2004.
- [7] Aihara T., Kim J.K., Okuyama K. and Lasek A., Controllability of Convective Heat Transfer of Magnetic Fluid in a Circular Tube, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 122, pp. 297-300, 1993.
- [8] Bajkowski M., Grzesikiewicz W., Sofonea M., Etude, modelisation et recherche de la temperature sur la dissipation de l'energie d'un amortisseur magnetorheologique, *XIII Seminaire Franco-Polonais de Mecanique*, Edition Polytech' Lille, 2005.
- [9] Bajkowski J., Sofonea M., Modélisation, description mathématique et les recherches de l'influence de la grandeur de la fissure de transfert du liquide sur les propriétés de la dissipation de énergie du amortisseur magnètorhologique, *Mat. De XIV Coll. Vibrations, Chocs et Bruit.*, Lyon, 2004.
- [10] Dogruoz M.B., *Fail-Safe, Semi-Active Controllable Magneto-Rheological Fluid (MRF) Shock Absorbers for Automotive Suspension Systems*, Master's Thesis, University of Nevada, 2000.
- [11] Ginder J.M. and Davis L.C., Shear Stresses in Magnetorheological Fluids: Role of Magnetic Saturation, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, no. 26, pp. 3410-3412, 1994.

- [12] Grzesikiewicz W., Bajkowski J., Osiński Z., Chocs d'un systeme d'enrainement avec frottement structurel, *Mat. X Coll. Vibrations, Chocs et Bruit*, Lyon, pp. 162-163, 1994.
- [13] Grzesikiewicz W., Bajkowski J., Modelowanie i symulacja uderzeń ciał sztywnych, *Materiały konferencji „Metody i Środki Projektowania”*, Warszawa, 1995.
- [14] Nishiyama H., Shigemi F., Masami N., *Numerical Simulation of MR Fluid Damping Characteristics Using a Modified Bingham Model*, Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1, Katahira, Aobaku, Sendai, 980-8577, Japan Matsushita Electric Works, Ltd., Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, Yamagata University, pp. 4-3-16, Japan 2002.
- [15] Lee H.S., Choi S.B., Wereley N.M., Performance Analysis of ER/MR Impact Damper Systems Using Herschel-Bulkley Model, *Journal of Int. Material Systems and Structures*, vol. 13/2002, Sage Publications, 2009.
- [16] Li W.H., Wang X.J., Tang X., Zhang P.Q., Generalized Analysis of Channel Flow of ER/MR Fluids Through Complex Geometries, *Proceedings of the 6th International Conference on Electrorheological Fluids*, 1997.
- [17] *Magnetorheological Suspensions and Their Applications* Yonezawa, Japan, July 22-25, pp. 347-355.
- [18] Lord Corporation, *MagnetoRheological Fluid MRF-240BS*, Product Bulletin, 1999.
- [19] Pang L., Kamath G.M., Wereley N.M., Dynamic Characterization and Analysis of Magnetorheological Damper Behavior, *The 5th SPIE Symposium on Smart Materials and Structure, Passive Damping and Isolation*, pp. 3327:3325-3327, 1998.
- [20] Spencer B.F. Jr., Dyke S.J., Sain M.K. and Carlson J.D. Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, March 10, 1996.
- [21] Spencer B.F. Jr., Dyke S.J., Sain M.K., Carlson J.D., Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper, *J.Eng. Mech.*, pp. 123:230-238, 1997.
- [22] Tylikowski A., Intelligence Structures, *Proceedings of International Conference Mechatronics*, Warsaw University of Technology, vol. 1, s. 19-25, 2000.
- [23] Wang X., Bossis G., Volkova O., Bashtovo V., Krakov M., *Active Control of Rod Vibrations Using Magnetic Fluids*, Universite de Nice Magnetorheological Suspensions and Associated Technology, Sheffield, UK, July 10-14, pp. 395-403.

- [24] Yang G., Spencer B.F. Jr., Carlson J.D. Jr, Sain M.K., Large – scale MR fluid dampers: modelling and dynamic performance considerations. *Proceedings of 2nd World Conference on Structural Control*, vol. 1, Kyoto, Japan, pp. 417-426, 1998.
- [25] Young-Tai Choi and Wereley N.M., *Comparative Analysis of the Time Response of Magnetorheological Dampers Using Nondimensional Parameters Smart Structures Laboratory*, Alfred Gessow Rotorcraft Center, Department of Aerospace Engineering, University of Maryland, USA.
- [26] Materiały katalogowe firmy „Liquids Research Limited”, Wielka Brytania, Bangor, LL57 2UP.
- [27] www.tu-dresden.de/mw/ilr/lampe/DATENBAN/MRF-UEB/MRF-EHG.HTM

Inhibited Recoil in the Special Object with the Magnetorheological Damper TR-1.0M

Marcin BAJKOWSKI, Michał KUCHARCZYK,
Roman GRYGORUK, Marek RADOMSKI

Abstract. This study is an attempt to explore the impact of introducing the system controlling the recoil effect by the use of the controlled magnetorheological damper (MR) to the weapon – gunner system. The analyzed modification will influence, among others, the recoil effect and the associated loss of stability of the weapon – gunner system in regard to maintaining the stability of weapon guidance on target. The study includes the results of laboratory tests of the weapon – gunner system equipped with a prototype of the TR-1.0M damper, as well as a rheological model of the system that has been developed together with a system of equations describing it. It also presents the estimated range of currents useful for controlling the magnetorheological structure and the optimal size of the slot in the damper. Taking into account the results of the laboratory tests, it may be concluded that the introduction of a structure based on the magnetorheological damper to the weapon – gunner system has a positive effect on the loss of stability of the system in regard to maintaining the stability of weapon guidance on target and increases the comfort of the gunner during firing.

Keywords: mechanics, dissipation, magnetorheology, recoil