



**WSTĘPNE BADANIA WKŁADÓW DO TŁUMIKÓW BRONI STRZE-
LECKIEJ WYKONANYCH W TECHNOLOGIACH PRZYROSTOWYCH**
PRELIMINARY TESTS OF INSERTS MADE IN ADDITIVE TECHNOLOGY
FOR SMALL GUN SILENCERS

Rafał WRÓBLEWSKI, rafał.wroblewski@pw.edu.pl, ORCID: 0000-0002-1616-5892

Dorian ŻARNA, 01170484@pw.edu.pl

Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska,

Faculty of Material Science and Engineering, Warsaw's University of Technology

Mariusz MAGIER, mariusz.magier@pw.edu.pl, ORCID: 0000-0002-4431-9537,

Marcin BAJKOWSKI, marcin.bajkowski@pw.edu.pl, ORCID: 0000-0003-2517-5379,

Roman GRYGORUK, roman.grygoruk@pw.edu.pl, ORCID: 0000-0003-4357-7873

Maja ŻELICHOWSKA, maja.zelichowska.stud@pw.edu.pl,

Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Warszawska,

Faculty of Mechanical and Industrial Engineering, Warsaw's University of Technology

Krzysztof SZCZUROWSKI, krzysztof.szczurowski@pw.edu.pl, ORCID: 0000-0002-2187-5776

Marcin JASIŃSKI, marcin.jasinski@pw.edu.pl, ORCID: 0000-0002-4434-8856

Piotr TADZIK, piotr.tadzik@pw.edu.pl,

Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Politechnika Warszawska,

Faculty of Automotive and Construction Machinery Engineering, Warsaw's University of Technology

Paweł SWEKLEJ, sweklejp@witu.mil.pl, ORCID: 0000-0002-5794-8906,

Mikołaj BOGAJCZYK, bogajczyk@witu.mil.pl ORCID: 0000-0002-7172-1214

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, *Military Institute of Armament Technology*

DOI 10.5604/01.3001.0053.7228

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wyniki badań nowo opracowanych wkładów wykonanych w technologiach przyrostowych do tłumika broni strzeleckiej kalibru 5,6 mm, przeznaczonego do karabinka Tippmann M4-22 PRO-S z gwintem 1/2x28 UNEF R/H. Badania przeprowadzono w Laboratorium Balistycznym Zakładu Mechaniki i Techniki Uzbrojenia Instytutu Mechaniki i Poligrafii Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Warszawskiej.

Słowa kluczowe: tłumik, broń strzelecka, technologia przyrostowa

1. Wstęp

Podstawowym zadaniem tłumika broni strzeleckiej jest minimalizacja możliwości

Abstract: The article presents the results of tests of inserts made in additive technology for a small arms silencer of 5.6 mm caliber, intended for the Tippmann M4-22 PRO-S carbine with 1/2x28 UNEF R/H thread. The tests were carried out in the Ballistics Laboratory of the Department of Mechanics and Armament Technology, Institute of Mechanics and Printing, Faculty of Mechanical Engineering, Warsaw University of Technology.

Keywords: silencer, small arms, additive manufacturing

1. Introduction

The main task of small arms silencer is to minimise detection of shooter and gun

wykrycia położenia broni i strzelca przez przeciwnika, które może być precyzyjne określone na podstawie systemów do lokalizowania źródła strzału [1–6]. Tłumik tłumi odgłos wystrzału na kilka sposobów: zmniejszając energię wewnętrzną gazów prochowych wydobywających się z lufy, zmniejszając ich prędkość wylotową i temperaturę lub przerywając przepływ gazu wprowadzając go np. w ruch wirowy. Parametry większości ochronników słuchu nie są w stanie zredukować impulsu ciśnienia poniżej 140 dB dla niektórych rodzajów broni palnej (fot. 1).

position by the enemy, which can be precisely established by systems localising the origin of a shot [1–6]. The silencer attenuates a report of the shot in many ways: by reducing internal energy of powder gases released from the barrel, and reducing their muzzle velocity and temperature, or interrupting the flow of gases by forcing them for instance into a rotary motion. Parameters of most hearing protection devices cannot reduce the pulse of pressure below 140 dB for some types of small arms (Photo 1).



Fot. 1. Tłumik dźwięku dedykowany do profesjonalnych zastosowań taktycznych (SilencerCo., LLC.)

Photo 1. Acoustic silencer dedicated to professional tactical applications (SilencerCo., LLC.)

Dźwięk wystrzałów jest połączeniem szeregu fal akustycznych powstałych w wyniku działania czterech głównych elementów: fali uderzeniowej gazowych produktów spalania, fali uderzeniowej generowanej w wyniku naddźwiękowego ruchu pocisku, fali utworzonej przez kolumnę powietrza wyrzucaną z lufy przed pociskiem oraz fali akustycznej generowanej przez zderzenie się ruchomych części broni podczas procesu strzału.

Podczas, gdy pocisk opuszcza przewód lufy pod wpływem oddziaływania wysokiego ciśnienia gazowych produktów spalania o wysokiej temperaturze jest generowana fala podmuchu wylotowego [7-16]. W zależności

The report of shots is a combination of many acoustic waves produced in effect of action of four main components: blasting wave of gaseous products of combustion, blasting wave generated by supersonic movement of projectile, a wave created by a column of air ejected from the barrel before a bullet, and an acoustic wave generated by impact of weapon's moving parts at the process of shooting.

When the bullet leaves the bore of barrel in effect of action of high pressure and temperature of gaseous combustion products the wave of outflow blowing is generated [7-16]. Depending on the increase of

od wzrostu energii wylotowej pocisku, intensywność fali impulsowej także wzrasta, powodując negatywny wpływ na ludzi i środowisko. W przeciwieństwie do innych rodzajów dźwięków, fala uderzeniowa ma wysoką energię, niską częstotliwość i impulsywność. Podmuch wylotowy jest silnie ukierunkowany, a propagacja dźwięku charakteryzuje się dość dużym zasięgiem [17–25].

Dodatkowym problemem jest sygnatura termiczna nagrzewającego się tłumika po oddaniu serii strzałów (fot.2).

bullet muzzle energy the intensity of the surging wave increases as well, providing a negative effect to people and environment. Just opposite to other types of sounds, the blasting wave has a high energy, and low frequency and impulsivity. The muzzle blow is highly directed and the sound carries at a relatively long range [17–25].

Additional problem is a thermal signature of heated silencer after delivering a series of shots (Photo 2).



Fot. 2. Przykładowy obraz termiczny części lufy i tłumika broni strzeleckiej po oddaniu serii strzałów (Naval Special Warfare Center, Crane Division)

Photo 2. Exemplary thermal image of a barrel part and the silencer of weapon after firing a series of shots (Naval Special Warfare Center, Crane Division)

Odgłosy broni palnej można podzielić na cztery powiązane ze sobą kategorie:

- dźwięki towarzyszące działaniu automatyki broni,
- dźwięki towarzyszące procesowi opuszczenia przez pocisk przewodu lufy,
- dźwięki towarzyszące procesowi przemieszczania się pocisku na torze lotu,
- dźwięki towarzyszące np. eksplozji, gdy pocisk uderza w cel.

Fale dźwiękowe, zwłaszcza w pobliżu wylotu lufy, są krótkotrwałe, rzędu milise-

The reports of firearms may be divided on four mutually related categories:

- the sounds accompanying the weapon automatics functioning,
- the sounds accompanying the process of bullet leaving the barrel bore,
- the sounds accompanying the process of bullet moving on the flight path ,
- the sounds accompanying the explosion, e.g. when the bullet hits a target.

The sound waves, especially at the barrel muzzle, are short lasting, in order of mil-

kund, a w małokalibrowej broni czas trwania impulsu dodatniego może być krótszy niż 0,5 milisekundy.

Konstrukcja nowoczesnego tłumika powinna charakteryzować się następującymi cechami:

- zwiększona niezawodność i wytrzymałość w stosunku do poprzednich wersji,
- poprawione właściwości redukcji sygnatury termicznej,
- wysoka skuteczność sytemu w zakresie tłumienia dźwięku, płomienia i temperatury gazowych produktów spalania,
- możliwie maksymalne zredukowane narażenia operatorów na oddziaływanie toksycznych oparów gazowych produktów spalania.

Dotychczasowe działania związane z konstruowaniem i wytwarzaniem tłumika są bezpośrednio związane są z możliwością fizycznego wykonania jego elementu tłumiącego. Rozpatrując konstrukcję tłumika można zauważyć, że wkład tłumiący składa się z powtarzalnych elementów, których skomplikowanie geometryczne odzwierciedla możliwość stosowalności obróbek ubytkowych. Wraz z rozwojem technik wytwarzania, szczególnie technik przyrostowych (addytywnych), które znakomicie niwelują geometryczne ograniczenia technik ubytkowych, można zauważyć coraz większą swobodę projektową uwzględniającą niestandardowe cechy geometryczne. Takie podejście wprowadza również nowe możliwości optymalizacji konstrukcji, rozumianej jako wprowadzenie metod analiz inżynierskich (np. MES, MEB, CFD) do projektowania specyficznych skomplikowanych geometrycznie kształtów możliwych do wytworzenia tylko we wspomnianych technikach przyrostowych.

W pracy przedstawiono wstępne badania funkcjonalności rzeczywistych wkładów tłumiących wykonanych w trzech technologiach

liseconds, and for the small arms the duration time of positive pulse may be shorter than 0.5 millisecond.

Design of modern silencer has to be characterised by following performance:

- increased reliability and resistance comparing to former versions,
- improved specifications on thermal signature reduction,
- high system efficiency for attenuation of sound, flame, and temperature of gaseous combustion products,
- possibly maximal reduction of a threat to operators over the action of toxic vapours of gaseous combustion products.

For years back, the actions connected with designing and production of silencers were directly linked with feasibilities for a physical making of its attenuating component. Considering the structure of the silencer it can be noted that an attenuating insert consists of repeatable components and their geometrical complexity is determined by capacities of decremental machining. Along with development of manufacturing technologies, especially additive ones, which effectively eliminate the limitations of decremental technologies, a greater designing invention at using off-standard geometrical forms can be noticed. Such approach introduces also new possibilities for optimisation of designs which can be understood as implementation of methods of engineering analyses (e.g. MES, MEB, CFD) for designing of specific and complex geometrical forms which can be only made with these additive technologies mentioned above.

The paper presents some preliminary tests over the functionality of real attenuating inserts prepared with three additive

przyrostowych, tj. FDM – ekstruzji polilaktydu PLA, SLS – spiekania proszku poliamidu wiązką lasera oraz SLM – spiekania proszku stali nierdzewnej 316 wiązką lasera, do tłumika AU1228 ECO przeznaczonego do karabinka Tippmann M4-22 PRO-S.

2. Charakterystyka wkładów tłumiących wykonanych w technologii addytywnej

Do badań użyto kilka wybranych wariantów wkładów do standardowego tłumika do broni kalibru 0.22 cala, wykonanych z następujących materiałów:

- PLA – wykonane w technologii FDM (fot. 3) w 3 rodzajach geometrii:

technologies, i.e. FDM – extrusion of polylactide PLA, SLS – polyamide powder sintering by laser beam, SLM – rust-less steel 316 powder sintering by laser beam, for silencer AU1228 ECO dedicated for carbine Tippmann M4-22 PRO-S.

2. Characteristics of Silencer Inserts Made in Additive Technology

A few selected variants of inserts for a standard silencer to 0.22 in. calibre gun made of the following materials were tested:

- PLA – made in technology FDM (Photo 3) in 3 types of geometry:



Fot. 3. Wkłady do tłumika wykonane w technologii FDM z materiału PLA (od góry: o stałym kształcie i skoku przegród, o zmiennym kształcie i skoku przegród, z układem zaworów Tesli)

Photo 3. Silencer inserts made of PLA material in FDM technology (from the top: with unchanged shape and pitch of barriers, with changeable shape and pitch of barriers, with system of Tesla valves)

- PA 2200 – wykonane w technologii SLS (fot. 4), dwusegmentowy o zmiennym kształcie i skoku przegród:

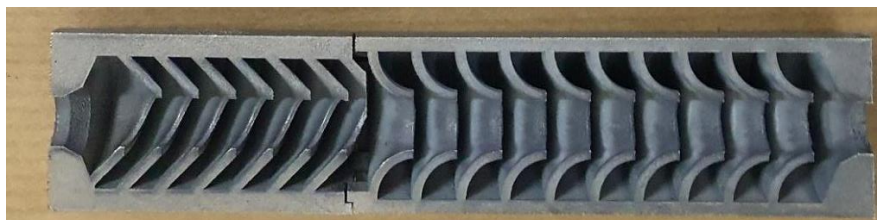
- PA 2200 – made in technology SLS (Photo 4), bi-segmented with changed shape and pitch of barriers;



Fot. 4. Wkład do tłumika wykonany w technologii SLS z materiału PA 2200

Photo 4. Silencer insert made of PA 2200 material in SLS technology

- Stali 316 – wykonane w technologii SLM (fot. 5) dwusegmentowy o zmien-
nym kształcie i skoku przegród, o geo-
metrii identycznej z wkładem PA 2200,
wykonanym w technologii SLS.
- Steel 316 – made in technology SLM
(Photo 5) bi-segmented with changed
shape and pitch of barriers and the
identical geometry as in the insert PA
2200 made in SLS technology.



Fot. 5. Wkład do tłumika wykonany w technologii SLM z materiału stal 316

Photo 5. Silencer insert made of steel 316 material in SLM technology

3. Wyniki badań dynamicznych

Celem przedmiotowych badań było przede wszystkim określenie poprawności działania nowo opracowanych wkładów do tłumika przeznaczonego do broni kalibru 0.22 LR w zakresie zdolności tłumienia dźwięków. Ponadto, ważnym elementem doświadczalnej weryfikacji opracowanych konstrukcji wkładów było stwierdzenie jaką żywotnością mogą charakteryzować się wkłady wykonane z tworzyw sztucznych typu PLA i PA2200.

Badania przeprowadzono w Laboratorium Balistycznym Zakładu Mechaniki i Techniki Uzbrojenia, Instytutu Mechaniki i Poligrafii Wydziału Mechanicznego Technologicznego, Politechniki Warszawskiej w zamkniętej strzelnicy o długości 50 m, w budynku wydziału. Do badań przygoto-

3. Results of Dynamic Tests

The purpose of subjective tests was most of all the establishment of correctness of operation for newly developed inserts to the silencer dedicated for 0.22 LR calibre gun regarding the absorption of sounds. Moreover, an important part of experimental verification of developed designs of inserts was to establish the life time of inserts made of plastic materials of PLA and PA2200 types.

The tests were carried out in the Ballistics Laboratory of the Department of Mechanics and Armament Technology, Institute of Mechanics and Printing, the Faculty of Mechanical Engineering at Warsaw's University of Technology on 50 m long shooting gallery placed inside the faculty building. Following materials were prepared

wano następujące materiały:

- naboje kalibru 0.22 LR szt. 50 (fot. 6):

for testing:

- cartridges calibre 0.22 LR,

**Fot. 6. Naboje 0.22LR
wykorzystane do badań**

*Photo 6. Cartridges 0.22LR
used for tests*



- uniwersalny przyrząd balistyczny UPB z uchwytami do broni długiej (fot. 7),
- zestaw aparatury kontrolno-pomiarowej do pomiaru prędkości pocisku w postaci bramek fotoelektrycznych (fot. 7),
- karabinek Tippmann M4-22 PRO-S kalibru 0.22 cala wyposażony w standardowy tłumik AU1228 ECO (fot. 8). Dobór broni i tłumika podyktowany był jej dostępnością do przedmiotowych badań (użyczenie przez pana dr. inż. Rafała WRÓBLEWSKIEGO).
- zestaw aparatury pomiarowej z czterema mikrofonami pomiarowymi.

- Universal ballistic stand UPB with fixtures for long guns (Photo 7),
- Set of measurement-checking instruments in form of photoelectric gates to measure the bullet's velocity (Photo 7),
- Carbine Tippmann M4-22 PRO-S calibre 0.22" equipped with standard silencer AU1228 ECO (Photo 8). Choice of gun and silencer was dictated by their accessibility to the subjective tests (lending for use by Mr. Rafał WRÓBLEWSKI, D. Sc.).
- Set of measurement instruments with four microphone meters.



**Fot. 7. Uniwersalny przyrząd balistyczny UPB z zamontowanym karabinkiem
Tippmann M4-22 PRO-S**

Photo 7. Universal ballistic stand UPB with integrated carbine Tippmann M4-22 PRO-S



Fot. 8. Tłumik AU1228 ECO do broni 0.22 cala wykorzystany podczas badań
 Photo 8. Silencer AU1228 ECO to 0.22" gun used at testing

Tabela 1. / Table 1

nr strzału	konfiguracja	vs m/s	Mik.	Peak dBA	Peak dBL	Mik.	Peak dBA	Peak dBL	Mik.	Peak dBA	Peak dBL	Mik.	Peak dBA	Peak dBL
1	Bez tłumika	345,33		153,0	154,8		155,6	158,4		127,1	127,1		129,9	130,4
2		328,11		151,9	154,8		154,9	158,4		127,3	126,6		132,5	132,2
3		337,38		152,3	154,1		154,5	157,3		130,0	128,9		131,0	130,7
4		339,30		151,9	154,4		154,5	156,9		129,9	130,2		131,4	131,9
5		339,17		152,0	154,8		154,6	157,2		127,3	126,4		131,3	131,4
	średnia	337,86		152,2	154,6		154,8	157,6		128,3	127,8		131,2	131,3
1	Tłumik oryginalny AU1228 ECO	344,30		135,3	139,0		126,9	130,6		120,6	121,0		118,1	119,1
2		bp		134,2	138,1		126,6	130,5		112,5	113,0		114,4	114,5
3		337,52		134,8	138,4		127,7	132,2		120,5	120,1		119,4	119,8
4		332,81		132,8	136,3		125,9	132,1		119,0	119,5		117,5	118,4
5		333,33		135,8	138,5		128,5	132,0		119,1	119,6		118,2	118,7
	średnia	336,99		134,6	138,1		127,1	131,5		118,3	118,6		117,5	118,1
1	Tłumik PLA o stałym skoku przegród	345,39		131,9	135,4		124,8	130,2		113,0	112,8		116,9	117,1
2		bp		130,4	134,0		124,6	129,6		112,0	112,2		115,1	115,7
3		336,05		131,1	133,8		128,1	132,1		118,0	118,1		117,4	117,6
4		bp		131,7	135,7		126,7	132,4		117,3	118,2		115,8	116,0
5		343,17		133,1	136,2		124,2	129,9		118,7	120,1		116,7	117,8
	średnia	341,54		131,6	135,0		125,7	130,8		115,8	116,3		116,4	116,8
1	Tłumik PLA o zmiennym skoku przegród	bp	mik. 1	130,2	132,6	mik. 2	124,5	128,2	mik. 3	119,3	119,7	mik. 4	117,1	117,3
2		343,12		131,3	135,7		126,8	130,7		119,8	120,1		117,2	117,7
3		345,01		128,7	132,1		125,3	125,9		120,1	119,2		117,1	118,8
4		341,65		131,0	134,4		125,6	130,8		118,9	119,7		116,2	117,4
5		342,52		130,1	134,8		124,8	129,2		119,2	119,0		116,8	116,9
	średnia	343,08		130,3	133,9		125,4	129,0		119,5	119,5		116,9	117,6
1	Tłumik PLA z układem zaworów Tesli	bp		143,7	146,8		137,8	142,1		126,0	125,4		123,0	123,4
2		bp		144,3	146,9		138,6	141,7		122,5	122,2		120,5	120,7
3		345,55		142,6	145,6		138,7	142,5		118,5	118,2		121,6	121,5
4		334,51		143,5	146,6		139,1	142,3		118,5	118,9		120,6	120,6
5		334,05		143,4	146,6		139,8	143,4		123,9	124,6		121,4	122,6
	średnia	338,04		143,5	146,5		138,8	142,4		121,9	121,9		121,4	121,8
1	Tłumik PA2200 dwusegmentowy o zmiennym skoku przegród	340,06		135,9	138,8		132,3	136,2		120,6	121,3		118,4	119,7
2		bp		135,5	138,9		131,0	134,3		121,1	121,1		117,2	118,4
3		bp		134,4	137,3		128,4	133,7		117,5	117,8		116,7	116,5
4		334,42		136,4	140,1		130,8	134,0		120,4	120,4		119,8	119,6
5		bp		133,7	136,4		127,4	131,1		118,6	119,1		115,5	116,8
	średnia	337,24		135,2	138,3		130,0	133,9		119,6	119,9		117,5	118,2
1	Tłumik stal 316 dwusegmentowy o zmiennym skoku przegród	328,84		129,3	132,8		124,3	128,2		117,7	118,2		117,2	116,2
2		332,32		126,8	130,4		128,4	128,1		121,9	122,1		122,9	123,2
3		329,27		129,5	132,3		125,5	128,5		116,7	118,0		115,0	115,0
4		332,59		127,5	130,0		124,8	127,7		117,0	118,2		116,0	117,5
5		334,52		127,5	129,6		124,6	126,1		116,6	117,4		117,1	117,1
	średnia	331,51		128,1	131,0		125,5	127,7		118,0	118,8		117,6	117,8

Nr strzału – Number of shot

Bez tłumika – Without silencer

Tłumik oryginalny AU... – Original silencer AU...

Tłumik PLA o stałym skoku przegród – Silencer PLA with constant pitch of barriers

Tłumik PLA o zmiennym skoku przegród – Silencer PLA with changing pitch of barriers

Tłumik PLA z układem zaworów Tesli – Silencer PLA with a system of Tesla's valves

Tłumik PA2200 dwusegmentowy o zmiennym skoku przegród – Silencer PA2200 bi-segmental with changing pitch of barriers

Tłumik stal 316 dwusegmentowy o zmiennym skoku przegród – Silencer steel 316 bi-segmental with changing pitch of barriers

Wyniki badań strzelaniem dla poszczególnych wariantów wkładów do tłumika wraz z pomiarem natężenia dźwięku zamieszczono w tabeli 1.

Pomiary przeprowadzono za pomocą czterech mikrofonów – mikrofony 1 i 2 umieszczone były na stojakach w okolicy wylotu tłumika (w odległości 30-50 cm), mikrofony 3 i 4 przymocowane były do elementów podłoża (około 1 m od wylotu tłumika) i ściany (na drzwiach około 5 m od wylotu tłumika).

4. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań strzelaniem wariantów wkładów do tłumika broni kalibru 0.22 cala, wykonanych w wybranych technologiach przyrostowych można stwierdzić, że:

- badane warianty wkładów tłumika nie miały istotnego wpływu na wartości prędkości początkowych pocisków,
- najslabszym wariantem pod względem tłumienia dźwięku okazał się tłumik z wkładem z materiału PLA wykonany w technologii FDM z układem zaworów Tesla (tłumienie o około 9 dB),
- dla pozostałych wariantów wkładów wykonanych z materiału PLA średnie tłumienie wyniosło około od 20 do 22 dB, zaś dla materiału PA2200 wyniosło około 17dB co odpowiadało w przybliżeniu parametrom tłumienia zmierzonym dla tłumika z wkładem oryginalnym,
- najlepszym wariantem pod względem tłumienia dźwięku był tłumik z wkładem dwusegmentowym o zmiennym kształcie i skoku przegród wykonany ze stali 316 (około 24 dB).
- wkłady wykonane z tworzyw PLA i PA2200 nie wykazywały istotnych śladów zużycia powierzchni roboczych po

Results of firing tests for particular variants of silencer's inserts and the measurements of sound intensity are presented in table 1.

The measurements were carried out by four microphones – microphones 1 and 2 were placed on stands near the silencer's muzzle (at distance 30-50 cm), microphones 3 and 4 were fixed to the ground (ca. 1 m from silencer's muzzle) and to the wall (on the doors ca. 5 m from silencer's muzzle).

4. Conclusions

On the base of received results of firing tests for variants of inserts to the silencer for 0.22" calibre guns prepared in selected additive technologies it can be stated that:

- Investigated variants of silencer's inserts have not seriously affected the values of bullet muzzle velocities,
- The worst variant, regarding the attenuation of sound, proved to be the silencer with an insert from PLA material made in FDM technology with the system of Tesla valves (attenuation by ca. 9 dB),
- For the remaining variants of inserts made of PLA material, the average attenuation was ca. from 20 to 22 dB, and for material PA2200 it was ca. 17dB what approximately corresponds to attenuation parameters measured for the silencer with the original insert,
- The best variant, regarding the attenuation of sound, proved to be the silencer with a bi-segmental insert with changing shape and pitch of barriers made of steel 316 (ca. 24 dB).
- The inserts made of plastics PLA and PA2200 have not indicated any visible traces of wearing on the working sur-

oddaniu badawczych serii strzałów, jednakże oszacowanie ich żywotności wymaga prowadzenia dalszych badań dynamicznych i środowiskowych.

- na obecnym, wstępnym etapie pracy, ze względu na małą ilość wyników, nie poddano analizie wpływu zastosowanego materiału i konstrukcji wkładu tłumika na tłumienie. Zaplanowano przeprowadzenie dalszych badań na badawczym tłumiku do broni 5,56 mm, których zakres pozwoli na dokonanie m.in. takiej analizy także w formie symulacji numerycznych.

faces after firing a testing series of shots, but the estimation of their standing can be done after the further dynamical and environmental tests.

- At the present initial stage of work the influence of the applied material and the structure of silencer's insert into the attenuation was not studied due to insufficient number of results. Further trials for the testing silencer to 5.56 mm guns are planned in the extension allowing among others for such studies, including those in form of numerical simulations, as well.

Treść artykułu oparto o wybrane wyniki projektu pt. „Nowoczesne stopy na bazie żelaza i na bazie miedzi przeznaczone do wytwarzania wyrobów o projektowanej strukturze i właściwościach z zastosowaniem technologii przyrostowych” (akronim MAT4AMT), nr umowy TECHMATSTRATEG 2/410049/12/NCBR/2019 realizowanego w ramach programu „Nowoczesne technologie materiałowe” - TECHMATSTRATEG II.

The paper was prepared on the basis of selected results of project „Modern Alloys on the Basis of Iron and Copper Dedicated for Fabrication of Products with Designed Structure and Properties at Application of Additive Technologies” (acronym MAT4AMT), nr of agreement TECHMATSTRATEG 2/410049/12/NCBR/2019 conducted under the frame of program „Modern Material Technologies” - TECHMATSTRATEG II.

Bibliografia / Bibliography

- [1] Meng, X.; Wang, Z.; Zhang, Z.; Wang, F. A Method for Monitoring the Underground Mining Position Based on the Blasting Source Location. *Meas. Sci. Rev.* 2013, 13, 45–49.
- [2] Hristov, N.; Kari, A.; Jerković, D.; Savić, S.; Sirovatka, R. Simulation and Measurements of Small Arms Blast Wave Overpressure in the Process of Designing a Silencer. *Meas. Sci. Rev.* 2015, 15, 27–34.
- [3] Sallai, J.; Hedgecock, W.; Volgyesi, P.; Nadas, A.; Balogh, G.; Ledeczi, A. Weapon classification and shooter localization using distributed multichannel acoustic sensors. *J. Syst. Archit.* 2011, 57, 869–885.
- [4] Vogel, H.; Dootz, B.; Wounds and weapons. *Eur. J. Radiol.* 2007, 63, 151–166.
- [5] Brożek-Mucha, Z. A study of gunshot residue distribution for close-range shots with a silenced gun using optical and scanning electron microscopy, X-ray microanalysis and infrared spectroscopy. *Sci. Justice* 2017, 57, 87–94.
- [6] Monturo, C. Ammunition. In *Forensic Firearm Examination*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019; pp. 21–71, ISBN 978-0-12-814539-5.
- [7] Carson, R.A.; Sahni, O. Numerical Investigation of Channel Leak Geometry for Blast Overpres-

- sure Attenuation in a Muzzle Loaded Large Caliber Cannon. *J. Fluids Eng.* 2014, 137, 021102.
- [8] Huang, Z.; Wessam, M.E.; Chen, Z. Numerical investigation of the three-dimensional dynamic process of sabot discard. *J. Mech. Sci. Technol.* 2014, 28, 2637–2649.
- [9] Carson, R.A.; Sahni, O. Numerical investigation of propellant leak methods in large-caliber cannons for blast overpressure attenuation. *Shock Waves* 2014, 24, 625–638.
- [10] Kang, K.-J.; Ko, S.-H.; Lee, D.-S. A study on impulsive sound attenuation for a high-pressure blast flowfield. *J. Mech. Sci. Technol.* 2008, 22, 190–200.
- [11] Rehman, H.; Chung, H.; Joung, T.; Suwono, A.; Jeong, H. CFD analysis of sound pressure in tank gun muzzle silencer. *J. Cent. South Univ. Technol.* 2011, 18, 2015–2020.
- [12] Scaling of Air Blast Waves. In *Fundamental Studies in Engineering*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1991; Volume 12, pp. 49–69, ISBN 978-0-444-88156-4.
- [13] Explosions and Pressure Waves. In *Industrial Safety Series*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1994; Volume 3, pp. 445–462, ISBN 978-0-444-89863-0.
- [14] Krehl, P. History of Shock Waves. In *Handbook of Shock Waves*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2001; pp. 1–142, ISBN 978-0-12-086430-0.
- [15] Phadnis, V.A.; Silberschmidt, V.V. 8.14 Composites Under Dynamic Loads at High Velocities. In *Comprehensive Composite Materials II*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018; pp. 262–285, ISBN 978-0-08-100534-7.
- [16] Phadnis, V.A.; Roy, A.; Silberschmidt, V.V. Dynamic damage in FRPs. In *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016; pp. 193–222, ISBN 978-0-08-100870-6.
- [17] Guo, Z. Numerical Simulation of Muzzle Blast Overpressure in Antiaircraft Gun Muzzle Brake. *J. Inf. Comput. Sci.* 2013, 10, 3013–3019.
- [18] Cheng, L.; Ji, C.; Zhong, M.; Long, Y.; Gao, F. Full-scale experimental investigation on the shock-wave characteristics of high-pressure natural gas pipeline physical explosions. *Int. J. Hydrog. Energy* 2019, 44, 20587–20597.
- [19] Fang, B.; Wang, Y.-G.; Zhao, Q. On multi-dimensional linear stability of planar shock waves for Chaplygin gases. *Appl. Math. Lett.* 2020, 102, 106085.
- [20] Yazdandoost, F.; Sadeghi, O.; Bakhtiari-Nejad, M.; Elnahhas, A.; Shahab, S.; Mirzaeifar, R. Energy dissipation of shock-generated stress waves through phase transformation and plastic deformation in NiTi alloys. *Mech. Mater.* 2019, 137, 103090.
- [21] Hokamoto, K.; Fujita, M. Shock-wave research on condensed matter at the High-Energy Rate Laboratory of Kumamoto University—An introduction. *Phys. B Condens. Matter* 1997, 239, 187–190.
- [22] Wu, J.; Liu, X.; Zhao, J.; Qiao, H.; Zhang, Y.; Zhang, H. The online monitoring method research of laser shock processing based on plasma acoustic wave signal energy. *Optik* 2019, 183, 1151–1159.
- [23] Otsuka, F.; Matsukiyo, S.; Hada, T. PIC Simulation of a quasi-parallel collisionless shock: Interaction between upstream waves and backstreaming ions. *High Energy Density Phys.* 2019, 33, 100709.
- [24] Xu, H.; Gao, J.; Yao, A.; Yao, C. The relief of energy convergence of shock waves by using the concave combustion chamber under severe knock. *Energy Convers. Manag.* 2018, 162, 293–306.
- [25] Tonicello, N.; Lodato, G.; Vervisch, L. Entropy preserving low dissipative shock capturing with wave-characteristic based sensor for high-order methods. *Comput. Fluids* 2020, 197, 104357.

