

Małgorzata SZYMICZEK, Sebastian SŁAWSKI, Jarosław DOMIN  
Wydział Mechaniczny- Technologiczny, Politechnika Śląska w Gliwicach  
e-mail: małgorzata.szymiczek@polsl.pl

## Wpływ procesu starzenia w warunkach szoków termicznych na odporność na przebicie kompozytu aramidowo-epoksydowego

**Streszczenie:** W pracy omówiono wpływ procesu starzenia na własności kompozytów epoksydowych, które mogą być wykorzystywane na lekkie osłony pochłaniające energię uderzenia. Celem pracy była ocena wpływu starzenia w warunkach szoków termicznych na wybrane własności obrazujące zachowanie kompozytu podczas ostrzału realizowanego za pomocą wyrzutni elektromagnetycznej. Badaniom poddano kompozyty aramidowo-epoksydowe poddane procesowi starzenia w warunkach szoków termicznych  $-20/130^{\circ}\text{C}$ . Kryterium oceny była średnica uszkodzenia powstała po uderzeniu penetratora w panel aramidowo-epoksydowego.

**Słowa kluczowe:** starzenie, kompozyty, żywica epoksydowa, aramid

EFFECT OF AGING IN CONDITIONS UNDER CONDITION OF THERMAL SHOCK ON PUNCTURE RESISTANCE OF ARAMID-EPOXY COMPOSITE

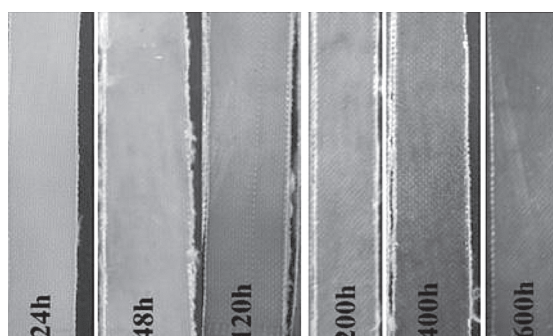
**Abstract:** The paper discusses the effect of aging on the properties of epoxy composites that can be used for a light-absorbing impact energy shields. The aim of the work was to evaluate the influence of aging under conditions of thermal shock on selected properties show behavior of composite during shelling using the electromagnetic launching. Aramid-epoxy composites were subjected to aging process under conditions of thermal shock  $-20/130^{\circ}\text{C}$ . The evaluation criterion was the damage diameter of the cavity after penetrator impact in aramid epoxy panel.

**Keywords:** aging, composites, epoxy resin, aramid

### 1. WSTĘP

Kompozytowe materiały polimerowe wykorzystywane do wytwarzania osłon energochłonnych obok obciążeń wynikających z aplikacji, narażone są na szereg, zróżnicowanych warunków środowiskowych, które powodują obniżenie ich własności użytkowych [1-3]. Jest to uwidocznione m.in. przez zmianę koloru (efekt starzenia termicznego) – rys. 1. W zależności od środowiska pracy, które zdefiniowane jest m.in. strefą klimatyczną materiały te są narażone m.in. na zróżnicowane promieniowanie UV, temperaturę użytkowania, wilgotność, oddziaływania czynników biologicznych czy chemicznych. Osobnym problemem jest wpływ obciążeń mechanicznych, którym poddane są panele podczas eksploatacji.

Badania prowadzone przez Mouzakisa [4], wykazały, że jednoczesne oddziaływanie promieniowania UV i ciepła prowadzi do zerwania wiązań chemicznych w osnowie poliestrowej, zmniejszenia sztywności materiału i własności wytrzymałościowych oraz zmian struktury, które uwidaczniają się m.in. przez pojawiające się mikropęknięcia powierzchniowe. Zafar [6] badając kompozyty węglowo-epoksydowe, wykazał, że spadek własności mechanicznych i oddziaływań międzyfazowych kompozytów zanurzonych w wodzie morskiej jest znaczniejszy niż w wodzie demineralizowanej. Na podstawie absorpcji wody można określić stan materiału kompozytowego [6,8]. W pracy [7] wykazano, że wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe, wraz z postępującym czasem starzenia, kompozytów aramido-



Rys. 1. Widok zmian kompozytu aramidowo-epoksydowego starzonego cieplnie w temperaturze 130°C

Fig. 1. View of changes in aramid-epoxy composite under thermal aging in temperature of 130°C

wo-epoksydowych wystawionych na działanie warunków środowiskowych spada wolniej niż kompozytów szklano-epoksydowych. W związku, z czym projektując panele kompozytowe wykorzystywane jako konstrukcje energochłonne należy uwzględnić zmienne warunki użytkowania.

Prowadzenie starzeniowych badań przyspieszonych pozwala na przewidywanie czasu użytkowania i opracowanie zależności czasu starzenia na własności użytkowe danej konstrukcji, co jest przydatnym narzędziem wspomagającym projektowanie.

Celem pracy jest ocena wpływu starzenia w warunkach szoków termicznych na wybrane

własności obrazujące zachowanie kompozytu o osnowie epoksydowej wzmocnionej włóknem aramidowym podczas ostrzału realizowanego za pomocą hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej. Kryterium oceny był pomiar średnicy wgłębienia powstałego w wyniku uderzenia pocisku. Dla porównania badaniom poddano kompozyty węglowo-epoksydowe. Włókna węglowe mogą budować wraz z włóknami aramidowymi struktury hybrydowe, które wykazują specyficzne własności.

Włókna aramidowe charakteryzują się zorientowaną strukturą, która ma istotny wpływ na tzw. wytrzymałość właściwa (jest około 3 razy większa niż dla włókna szklanego), wy-

Tabela 1. Właściwości wybranych włókien aramidowych opracowane na podstawie kart charakterystyk

Table 1. Properties of selected aramid fibers based on technical guide

	KEVLAR 29	KEVLAR 49	KEVLAR 149	TWARON Hm	Nomex
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	1,44	1,45	1,47	1,44	1,40
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	2900	3010	3450	3150	700
Moduł E [GPa]	59	125	179	115	17
Wydłużenie przy zerwaniu [%]	3,6	2,4	1,6	2,5	22
Absorpcja wody [%]	7,0	3,5	2,4	3,5	5,3
Temperatura użytkowania w powietrzu [°C]	177	180	225	180	180
Temperatura rozkładu [°C]	420	425	500	425	400
Przewodność cieplna [W/m ·K]	---	0,04	0,042	---	---

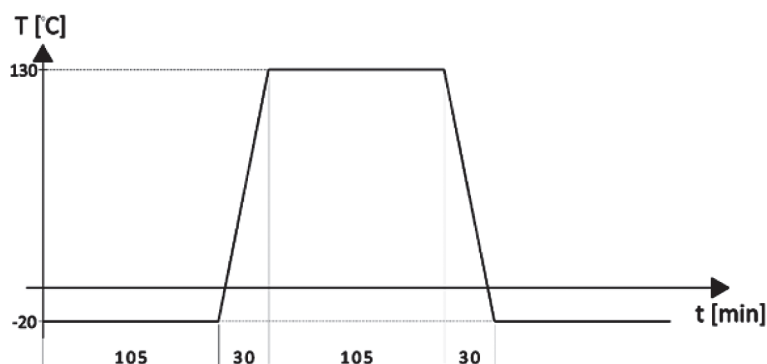
soką sztywnością i wytrzymałością na rozciąganie czy zginanie, a także wytrzymałością zmęczeniową, stosunkowo dużą energią zniszczenia, ponadto są stabilne termicznie i odporne chemicznie, z wyjątkiem mocnych kwasów organicznych i zasad. Literatura podaje, że włókno Twaron poli(tereftalano-1,4-fenylodiamid – PPTA) redukuje głębokość uderzenia kul w kamizelkę ochronną do 30%. Własności włókien aramidowych przedstawiono w tabeli 1.

Jednak nadrzędnym kryterium projektowania struktury paneli energochłonnych jest redukcja wagi i gabarytów przy jednoczesnym zapewnieniu jak najwyższego poziomu energochłonności [8,9].

## 2. BADANIA EKSPERYMNTALNE

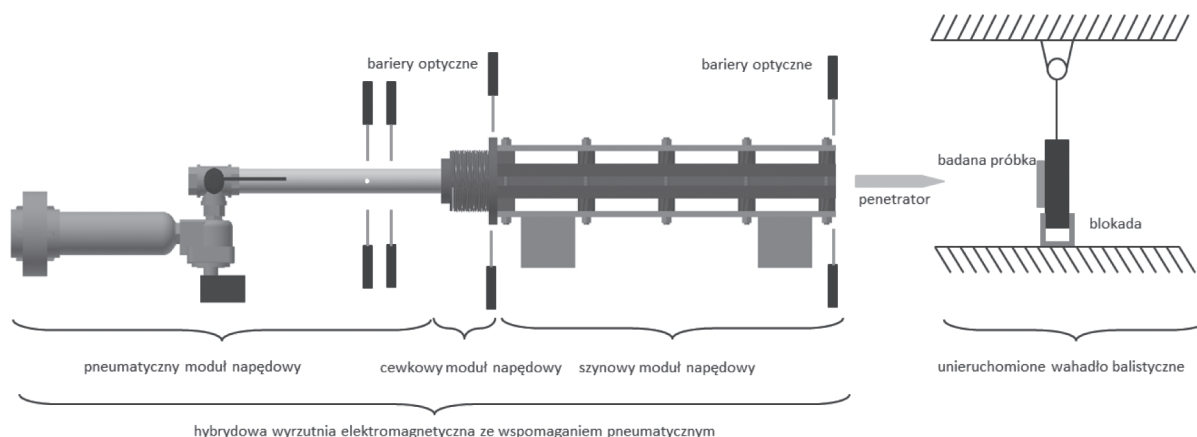
### 2.1. METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono na kompozytach o osnowie z żywicy epoksydowej (utwardzonej aminą polialifatyczną) wzmocnionych tkaniną aramidową i węglową, które wykonano metodą laminowania ręcznego ze wspomaganiem podciśnieniem. Próbki o wymiarach 100x25 mm wycięto z laminatów wzmocnianych tkaninami aramidową (grubość 3 mm – dziewięć sztuk) i węglową (grubość 2 mm – 3 sztuki). Próbki składały się z 8 warstw materiału wzmocniającego ułożonych naprzemiennie 0°/90°.



Rys. 2. Cyklogram procesu starzenia

Fig. 2. Cycle of the aging process



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego [11]

Fig. 3. Test stand schema [11]

Celem określenia zmian w warunkach eksploatacji, kompozyty aramidowo-epoksydowe poddano starzeniu w warunkach szoków termicznych (temperatura  $-20/+130^{\circ}\text{C}$ , czas wytrzymania w danej temperaturze 105 min., czas zmiany temperatury 30 min. – rys. 2).

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono na stanowisku z hybrydową wyrzutnią elektromagnetyczną składającą się z trzech modułów napędowych: pneumatycznego, elektromagnetycznego z cewką oraz elektropneumatycznego z szynami.

W trakcie przeprowadzania eksperymentu korzystano wyłącznie z modułu pneumatycznego. Budowa tego układu pozwala na regulację początkowej wartości ciśnienia  $P_0$  – rys. 3, a jego zmiana wpływa na wartość prędkości osiągniętej przez penetrator (rys. 4) wykorzystywany w trakcie badań. Wystrzelony penetrator uderzał w próbkę zamocowaną w uchwycie o podłożu wykonanym z polietylenu.

Pomiar prędkości penetratora poruszającego się wewnątrz cylindra realizowany jest przez optyczny układ pomiaru prędkości. Układ ten składa się z źródła światła (fotodiody) oraz odbiornika (fototranzystor). Sygnał z bariery optycznej jest rejestrowany przy pomocy oscyloskopu, a prędkość jest wyznaczana na podstawie pomiaru czasu przesłonięcia bariery przez penetrator (stan niski sygnału).

Prędkość penetratora wyznaczono według poniższej zależności:

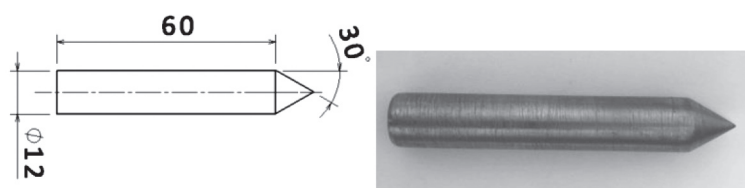
$$v_p = \frac{l_p}{\Delta t} \quad (1)$$

gdzie:

$l_p$  – długość penetratora [m],

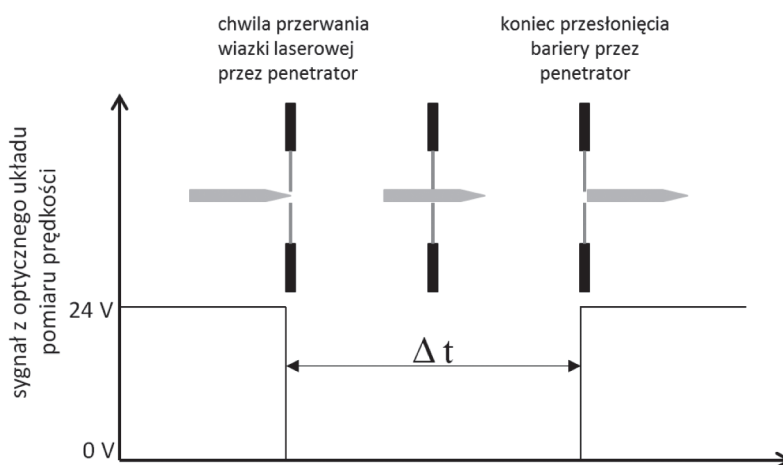
$\Delta t$  – czas przesłonięcia bariery optycznej [s].

Na podstawie zarejestrowanej przez barierę optyczną prędkości penetratora oraz jego masy



Rys. 4. Penetrator wykorzystany do badań

Fig. 4. Penetrator used in experiment



Rys. 5. Idea pomiaru prędkości penetratora z zastosowaniem optycznego układu pomiaru prędkości

Fig. 5. Idea of velocity measurement by using optical barrier system

wyznaczono wartości energii kinetycznej uwalnianej w momencie jego uderzenia w kompozytowe próbki, którą wyznaczono z zależności:

$$E_k = \frac{m * v^2}{2} \quad (2)$$

gdzie:

$E_k$  - energia kinetyczna [J],

$m$  - masa [kg],

$v$  - prędkość [m/s].

Badania prowadzono z założonymi prędkościami, dla których określono odpowiednio energie kinetyczne – tabela 2.

D - kompozyt wzmocniany włóknem aramidowym (60 cykli procesu starzenia). Jak można zaobserwować na przedstawionych zdjęciach największe średnice wgłębienia od penetratora odnotowano dla kompozytów wzmocnionych włóknem węglowym, bez względu na wartość energii uderzenia. Jest to wynikiem własności kompozytu węglowo-epoksydowego. W przypadku kompozytów aramidowo-epoksydowych średnice wgłębienia powstającego od penetracji pocisku są mniejsze niż dla materiałów o wzmocnieniu węglowym. Trudno natomiast doszukać się zależności pomiędzy liczbą cykli starzeniowych a zmianą średnicy

**Tabela 2. Energia kinetyczna**

**Table 2. Kinetic energy**

Masa pocisku [kg]	Ciśnienie [bar]	Prędkość pocisku [m/s]	Energia kinetyczna [J]
0,056	2	9	2,27
	3	12	4,03
	4	13,5	5,1

Oceny wpływu starzenia w warunkach szoków termicznych dokonano na podstawie pomiaru średnicy wgłębienia od strony ostrzału oraz zweryfikowano obraz uszkodzenia próbki po drugiej stronie (na przejście). Analizy obrazu przeprowadzono na mikroskopie ZEISS Discovery V12.

## 2.2. WYNIKI BADAŃ

W tabeli 3. zestawiono obrazy uszkodzeń paneli kompozytowych poddanych badaniom odporności na uderzenie (strona A). A oznacza kompozyt wzmocniany włóknem węglowym (0 cykli procesu starzenia) wykorzystany jako materiał porównawczy, B jest to kompozyt wzmocniany włóknem aramidowym nie poddany procesowi starzenia (0 cykli procesu starzenia), C - kompozyt wzmocniany włóknem aramidowym (10 cykli procesu starzenia),

wgłębienia, co może być spowodowane stopniem się penetratora lub niedokładnym jego prowadzeniem w osi.

W tabeli 4 zestawiono obrazy uszkodzeń paneli kompozytowych na powierzchni przeciwnej do ostrzeliwanej (strona B). Panele wykonane z kompozytów węglowo-epoksydowych wykazują podatność przebicia dla każdej energii uderzenia, tak jak w przypadku kompozytów aramidowo-epoksydowych nie poddanych starzeniu. Kompozyty aramidowo-epoksydowe zostały jednak uszkodzone w mniejszym stopniu - nie występują przebicia panelu. Dla próbek aramidowo-epoksydowych poddanych starzeniu w warunkach szoków termicznych i ostrzeliwanych penetratorem z energią uderzenia 2,27 i 4,03 [J], nie obserwuje się zmian na powierzchniach przeciwległych do ostrzeliwanych. Jedyne widoczne zmiany na powierzchni B występują dla energii uderzenia 5,1 [J].

Tabela 3. Obrazy uszkodzeń paneli kompozytowych po uderzeniu penetratora (strona A)

Table 3. Views of damaged of composite panels after penetrator impact (side A)

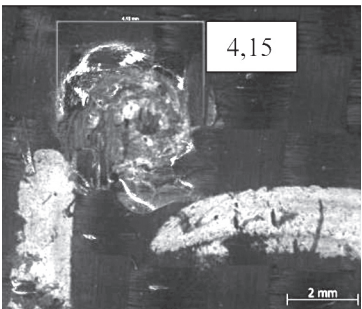
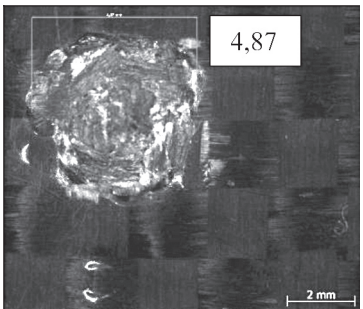
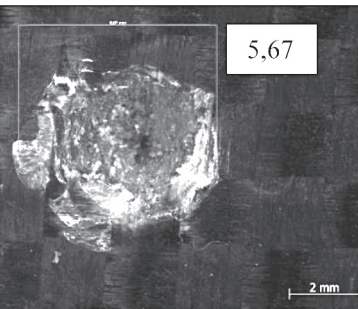
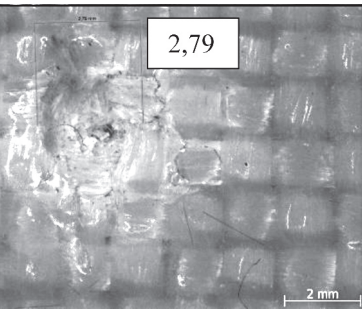
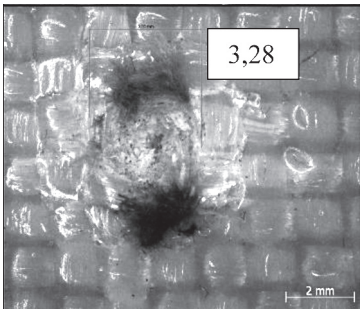
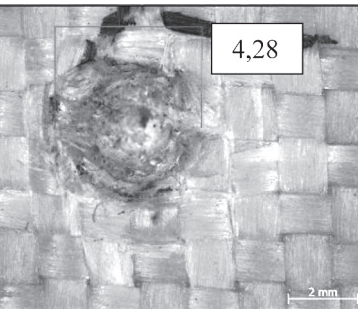
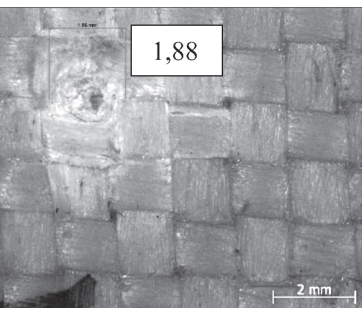
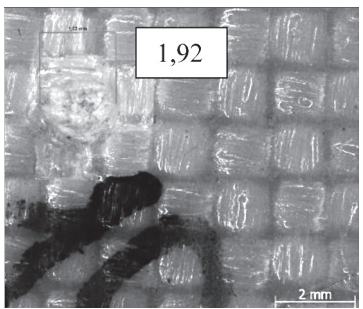
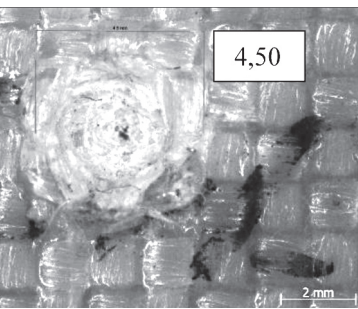
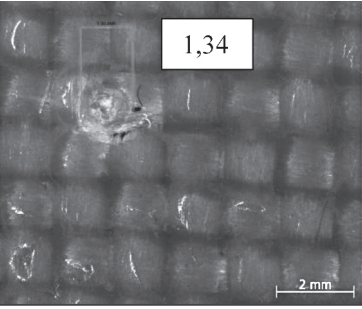
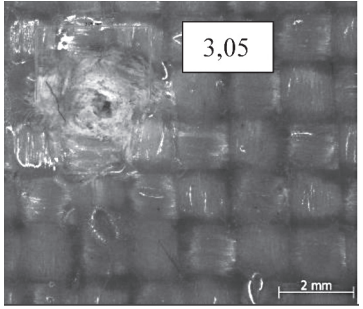
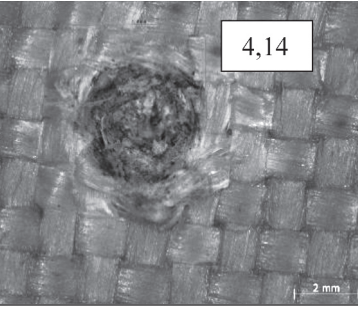
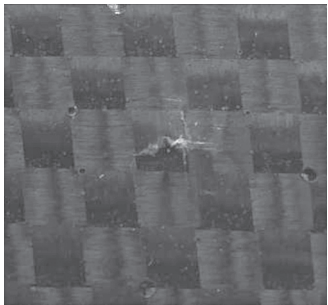
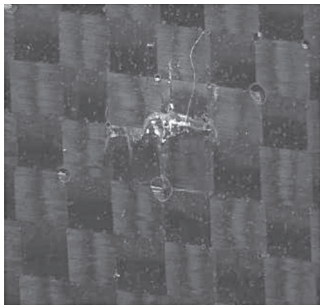
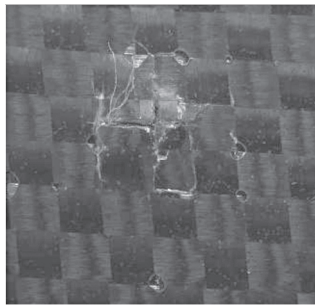
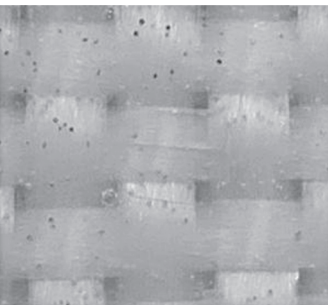
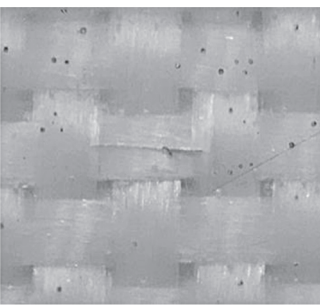
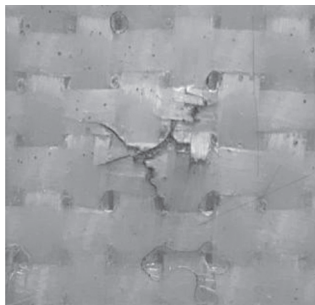
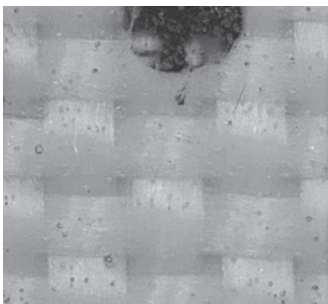
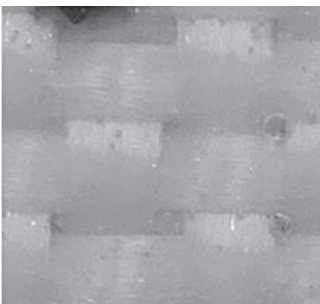
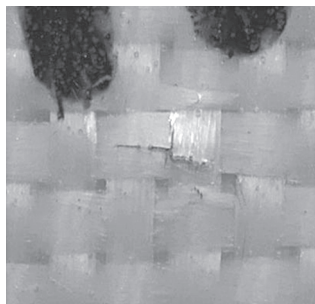
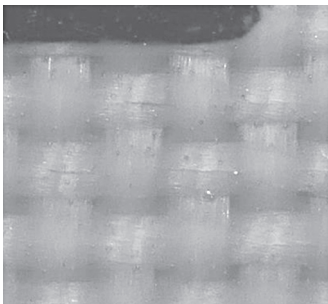
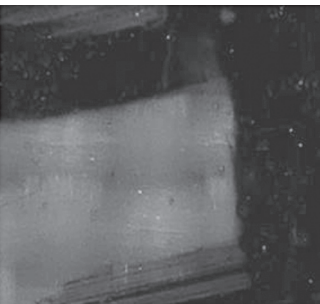
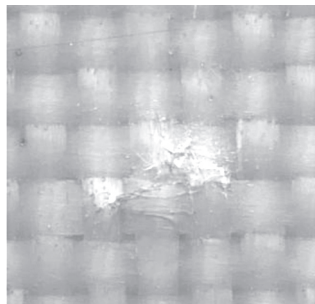
		Energia uderzenia [J]		
		2,27	4,03	5,1
Materiał	A			
	B			
	C			
	D			

Tabela 4. Widok uszkodzeń na powierzchni przeciwnej do ostrzeliwanej (strona B)

Table 4. Views of damaged composite after penetrator impact (side B)

		Energia uderzenia [J]		
		2,27	4,03	5,1
Materiał	A			
	B			
	C			
	D			

### 3. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:

W badanym zakresie lepszą odporność na uderzenie penetratora wykazują kompozyty aramidowo-epoksydowe. Średnice wgłębienia powstałe przy penetracji pocisku od strony ostrzału dla niestarczonych kompozytów aramidowo-epoksydowych są o około 30% mniejsze niż dla kompozytów węglowo-epoksydowych (tabela 3).

Największe uszkodzenia dla kompozytów aramidowo-epoksydowych na powierzchni przeciwnej do ostrzeliwanej zaobserwowano dla próbek nie poddanych starzeniu (tabela 4, zdjęcia B). Dla próbek poddanych starzeniu największe uszkodzenia widoczne są tylko przy największej energii uderzenia 5,1[J] (tabela 4, zdjęcia C,D).

Starzenie kompozytów polimerowych ma wpływ na proces penetracji pocisku w panelu, jednak dla pełnego obrazu należy przeprowadzić dodatkowe badania pozwalające na zdefiniowanie wpływu warunków eksploatacji na zachowanie się materiału podczas ostrzału.

### LITERATURA

1. Mallick P.K.: Fiber reinforced composites: materials, manufacturing, and design. Third edition. CRC Press, Boca 2007,
2. Harris B.: Fatigue in composites. Woodhead Publishing Limited, Cambridge 2003,
3. Campbell F.C.: Fatigue and Fracture: Understanding the Basics. ASM International, Ohio 2012.
4. Mouzakis D.E., Zoga H., Galiotis C.: Accelerated environmental ageing study of polyester/glass fiber reinforced composites (GFRPCs). *Composites Part B: Engineering*, Vol. 39, No. 3, 2008, p. 467-475.
5. Zafar, A.; Bertocco, Fabio; Schjødt-Thomsen, J.; Raue, Jens Christian M.: Investigation of the long term effects of moisture on carbon fibre and epoxy matrix composites. *Composites Science and Technology*, Vol. 72, No. 6, 27.03.2012, p. 656-666,
6. Gaur U., Miller B.: Effects of environmental exposure on fiber/epoxy interfacial shear strength. Vol. 11, 4, 1990, p.217-222,
7. Xiao G. Z., Shanahan M. E. R., Water Absorption and Desorption in an Epoxy Resin with Degradation, *Journal of Polymer Science*, 35, 1997, 2659-2670
8. Szymiczek M.: Dobór materiałów inżynierskich na lekkie osłony energochłonne. *Przetwórstwo Tworzyw* 2016 R. 22 nr 5, s. 482-496,
9. Rojek M., Szymiczek M., Stabik J., Mężyk A., Jamroziak K., Krzystała E., Kurowski J.: Composite materials with the polymeric matrix applied to ballistic shields. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2013 vol. 63 nr 1, s. 26-35,
10. R. Kroczek, J. Domin: Projekt pneumatycznego modułu napędowego jako zadajnika prędkości początkowej w hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej. *Zesz. Probl. Masz. Elekt.* 2015 nr 108, s. 89-94
11. J. Domin, Ł. Kutyna: Monitoring acceleration process of missile in the hybrid electromagnetic launcher with use of FPGA module. 2017 International Symposium on Electrical Machines. SME 2017, Naleczow, Poland

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 01-10-2017

Data akceptacji publikacji do druku: 22-11-2017