

Sebastian SŁAWSKI^{a)}, Małgorzata SZYMICZEK^{a)}, Błażej CHMIELNICKI^{b)}

^{a)} Instytut Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice

^{b)} Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55, 87-100 Toruń
e-mail: sebastian.slawski@polsl.pl

Odporność na przebicie kompozytów epoksydowo-węglowych poddanych starzeniu w warunkach szoków termicznych

Streszczenie: Celem pracy była ocena wpływu procesu starzenia w warunkach szoków termicznych na odporność na przebicie paneli kompozytowych wykonanych metodą laminowania ręcznego z wykorzystaniem podciśnienia. Panele użyte w badaniach składały się z 8 warstw materiału wzmacniającego w postaci tkaniny węglowej o splocie płóciennym oraz gramaturze 200 g/m². Jako osnowę zastosowano żywice epoksydową sieciowaną utwardzaczami aminowymi o zróżnicowanej lepkości i liczbie aminowej (Aradur 3486 oraz Aradur 3487) oraz aminą polifatyczną (Aradur 3405). Przygotowane próbki zostały poddane procesowi starzenia w warunkach szoków termicznych (-20/+130 °C) w komorze ATT Discovery 650. Badania dotyczące odporności na przebicie zostały przeprowadzone na hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganie pneumatycznym. Jako penetrator zastosowano stalowy pocisk zakończony stożkiem o kącie rozwarcia 60° oraz masie 55g. Badania zostały przeprowadzone z różnymi energiami kinetycznymi penetratora (2,9J, 4,3J, 5,8J). Ocena odporności na penetrację została dokonana na podstawie średnicy wgłębienia powstałego po uderzeniu penetratora w kompozytowy panel.

Słowa kluczowe: włókna węglowe, laminat, proces starzenia, odporność na przebicie

PUNCTURE RESISTANCE OF EPOXY-CARBON COMPOSITES SUBJECTED TO AGEING PROCESS IN THE THERMAL SHOCK CONDITIONS

Abstract: The objective of the paper was the evaluation of ageing process influence in the condition of shock temperature to the puncture resistance of epoxy-carbon composites. Composite panels have been made by manual laminating method with additional use of vacuum. Prepared samples consist of 8 layers of reinforcement material in the form of carbon plain fabric with the weight of 200 g/m². As a matrix, epoxy resin has been used. Resin has been mixed with curing agents with different viscosity and amine number (Aradur 3486 and Aradur 3487) and polyfatic amine (Aradur 3405). Prepared samples were subjected to the ageing process in thermal shock conditions (-20/+130 °C) in ATT Discovery 650 chamber. The tests of the puncture resistance have been performed on hydromagnetic launcher with pneumatic support. As a penetrator, a steel bullet was applied, with the mass of 55g, which ended with a cone of opening angle 60°. Tests have been performed with several different kinetic energies of the penetrator (2,9J, 4,3J, 5,8J). Evaluation of the puncture resistance has been conducted, based on the cavity diameter created after penetrator's impact on the composite panel

Keywords: carbon fiber, laminate, ageing process.

1. WPROWADZENIE

Istotnym czynnikiem wpływającym na proces projektowania pojazdów specjalnego przeznaczenia jest zapewnienie ich odpowiedniej mobilności oraz zagwarantowanie możliwie jak najwyższego stopnia ochrony załogi [9]. Mobilność pojazdu jest powiązana z masą jego

podzespołów, ekwipunku oraz dodatkowego opancerzenia odpowiedzialnego za zapewnienie bezpieczeństwa. Ważne jest, więc zminimalizowanie masy dodatkowych elementów mocowanych na pojeździe. Optymalnym rozwiązaniem wydaje się stosowanie lekkich osłon balistycznych, które w znacznym stopniu wpływają na redukcję masy. W osłonach tego typu

wykorzystuje się ceramikę, która mocowana jest na panele kompozytowe (wzmacniane włókami szklanymi, aramidowymi czy też węglowymi).

Włókno węglowe swymi własnościami mechanicznymi znacznie przewyższa własności innych włókien wzmacniających. Włókna te cechują się małą gęstością, wysoką wytrzymałością na rozciąganie, modułem Younga, wytrzymałością zmęczeniową oraz wytrzymałością na pękanie, dobrze tłumią drgania i są odporne na ścieranie i szokowe zmiany temperatury. Charakteryzują się dobrą przewodnością elektryczną. Wysoka wytrzymałość włókna węglowego na rozciąganie, a także jego wysoki moduł Younga związane są ze stopniem zorientowania struktury włókna w stosunku do jego osi, a także z gęstością wiązań poprzecznych [2]. W tabeli 1 zestawiono wartości modułu sprężystości poprzecznej oraz wytrzymałość na rozciąganie różnych typów włókien oraz kompozytów, w których zostały one wykorzystane jako materiał wzmacniający.

Podstawową wadą ograniczającą zastosowanie włókien węglowych jako wzmocnienie w osłonach balistycznych jest jego przewodność elektryczna [1]. 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 [3-5].

Tab. 1. Porównanie wartości modułu sprężystości poprzecznej oraz wytrzymałości na rozciąganie różnych włókien wzmacniających i kompozytów polimerowych [10]

Tab. 1. Comparison of values of the elasticity transverse modulus and tensile strength of the selected reinforcement fibres and polymer composites [10]

Materiał	Moduł sprężystości podłużnej E [GPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R _m [GPa]
Włókno węglowe	253	4,5
Włókno aramidowe (Kevlar®)	124	3,6
Włókno szklane	86	4,5
Kompozyt wzmacniany włóknami węglowymi	145	2,3
Kompozyt wzmacniany włóknami aramidowymi	80	2,0
Kompozyt wzmacniany włóknami szklanymi	55	2,0

Celem pracy jest ocena wpływu procesu starzenia w warunkach szoków termicznych na odporność na penetrację paneli kompozytowych. Ze względu na specyficzne własności włókien węglowych zakłada się, że ich zastosowanie w osłonie o wzmocnieniu hybrydowym pozwoli na podwyższenie odporności na penetrację pocisku. W pracy przedstawiono wstępne badania mające na celu zdefiniowanie mechanizmu zniszczenia paneli wzmacnianych włóknem węglowym. W przeprowadzonych analizach uwzględniono również wpływ zastosowanego utwardzacza na obraz zniszczenia.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

2.1. METODYKA BADAŃ

W badaniach wykorzystane zostały epoksydowo – węglowe panele kompozytowe wykonane metodą laminowania ręcznego ze wspomaganiami podciśnieniem. Jako wzmocnienie zastosowano tkaninę węglową o splocie płóciennym oraz gramaturze 200 g/m². Powstałe panele składały się z 8 warstw materiału wzmacniającego. Jako osnowę autorzy zastosowali żywicę epoksydową Araldite LY1564 sieciowaną utwardzaczami aminowymi o zróżnicowanej lepkości i liczbie aminowej (Aradur 3486 oraz Aradur 3487) oraz aminą polifatyczną (Aradur 3405). Własności osnowy w zależności od zastosowanego utwardzacza przedstawiono w tabeli 2.

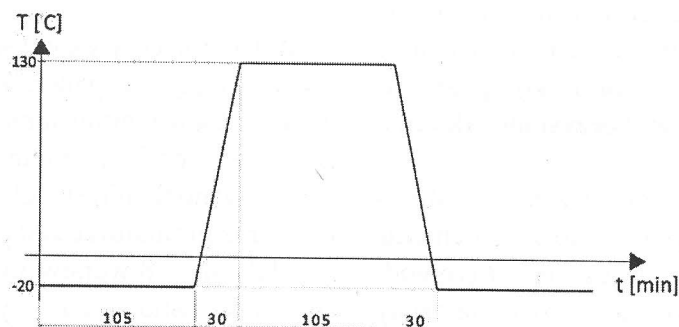
Tab. 2. Własności żywicy epoksydowej Araldite LY 1564 w zależności od zastosowanego utwardzacza
 Tab. 2. Araldite LY 1564 epoxy matrix properties depending on applied curing agents

Własność materiału	ŻYWICA / UTWARDZACZ		
	XB 3486	XB 3487	XB 3405
Lepkość 25°C [mPas]	200 ÷ 300	200 ÷ 320	420 ÷ 520
Czas żelowania w temperaturze 80°C [h]	8	8	8
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	118 ÷ 130	118 ÷ 130	116 ÷ 130
Wydłużenie do zerwania [%]	10,5 ÷ 12,5	10,0 ÷ 12,0	9,2 ÷ 10,1

Przygotowano próbki o wymiarach 100 x 25mm, które poddano starzeniu w warunkach szoków termicznych zgodnie z cyklogramem (temperatura -20/+130°C, czas wytrzymania w danej temperaturze 105 min., czas zmiany temperatury 30 min.) przedstawionym na rysunku 1. Liczba cykli wynosiła

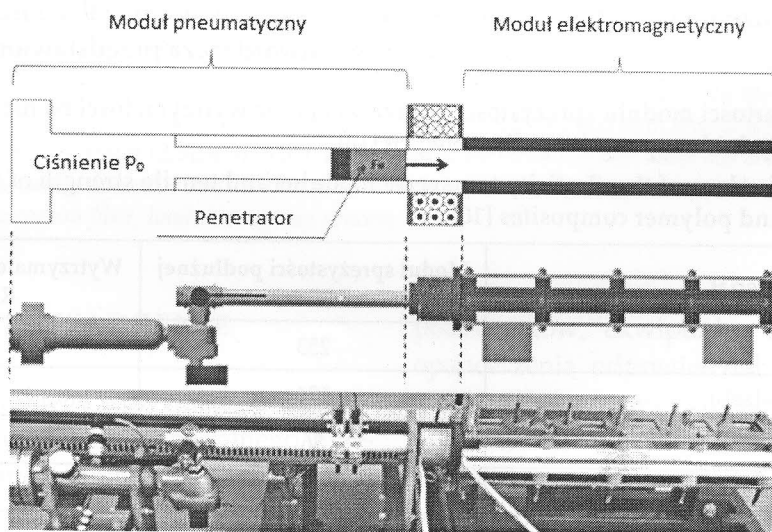
odpowiednio 10, 60 oraz 120. Badania starzeniowe przeprowadzono w komorze ATT Discovery 650.

Otrzymane wyniki odniesione zostały do własności próbek referencyjnych, kondycjonowanych w temperaturze pokojowej, przez czas odpowiadający maksymalnej liczbie cykli.



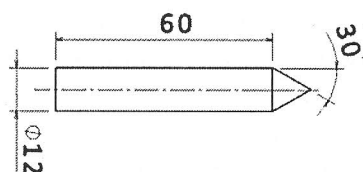
Rys. 1. Cyklogram procesu starzenia [6]

Fig. 1. Cycle graph of the ageing process [6]



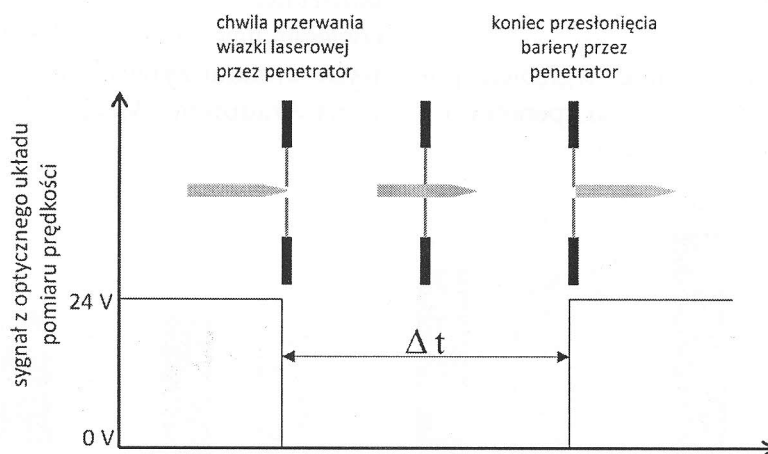
Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego [8]

Fig. 2. Test stand scheme [8]



Rys. 3. Geometria penetratora [6]

Fig. 3. Geometry of the penetrator [6]



Rys. 4. Idea pomiaru prędkości penetratora z wykorzystaniem bariery optycznej [6]

Fig. 4. Idea of velocity measurement by using optical barrier system [6]

Badanie dotyczące odporności na penetrację przeprowadzono na hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej ze wspomaganiami pneumatycznym [7]. Układ pneumatyczny zastosowany w urządzeniu umożliwia regulację ciśnienia początkowego P_0 w zbiorniku. Wartość tego ciśnienia przekłada się bezpośrednio na prędkość oraz energię kinetyczną penetratora.

Penetratorem wykorzystywanym w badaniach był stalowy pocisk zakończony stożkiem o kącie rozwarcia 60° oraz masie 55g (rys. 3), którym strzelano z trzema różnymi wartościami ciśnienia początkowego P_0 . Prędkość penetratora mierzono za pomocą bariery optycznej, która pozwala na pomiar czasu jej przesłonięcia przez penetrator przemieszczający się wewnątrz rury z polichloro-fluoroetylenem (PTFE). Zastosowanie tego materiału pozwala na zminimalizowanie współczynnika tarcia pomiędzy rurą a przemieszczającym się wewnątrz niej penetratorem, co w konsekwencji prowadzi do mniejszych strat energii pocisku.

Kiedy penetrator wchodzi w obszar działania bariery dochodzi do zmiany wartości sygnału

napięciowego. Zjawisko takie obserwowane jest również w momencie opuszczenia przez penetrator obszaru bariery (rys. 4).

Odniesienie długości penetratora do czasu przesłonięcia bariery umożliwia wyznaczenie jego prędkości, która służy do wyznaczenia energii kinetycznej zgodnie z zależnością:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1)$$

gdzie:

E_k - energia kinetyczna [J],

m - masa [kg],

v - prędkość [m/s].

W trakcie przeprowadzania eksperymentu dobrane wartości ciśnienia początkowego P_0 przełożyły się na uzyskanie przez penetrator energii kinetycznej wynoszącej 2,9J, 4,3J oraz 5,8J. Penetrator uderzał w panel zamontowany na podkładzie wykonanym z polietylenem o grubości 10 mm. Geometrię penetratora sprawdzano co 6 strzałów, co miało wyeliminować

ewentualne błędy wynikające z jego stopienia w trakcie przeprowadzania eksperymentu.

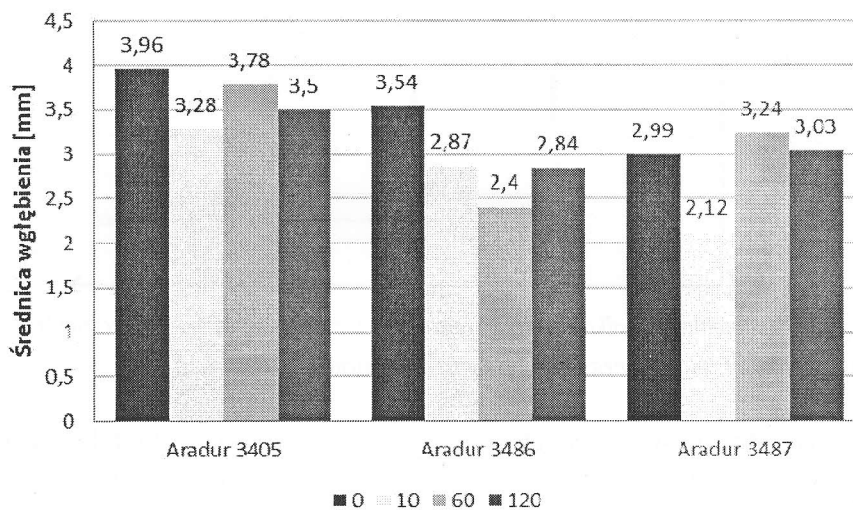
Oceny wpływu starzenia w warunkach szoków termicznych dokonano na podstawie pomiaru średnicy wgłębienia od strony ostrzała. Badania analizy średnicy oraz obrazu wgłębienia przeprowadzono na mikroskopie ZEISS Discovery V12.

2.2. WYNIKI BADAŃ

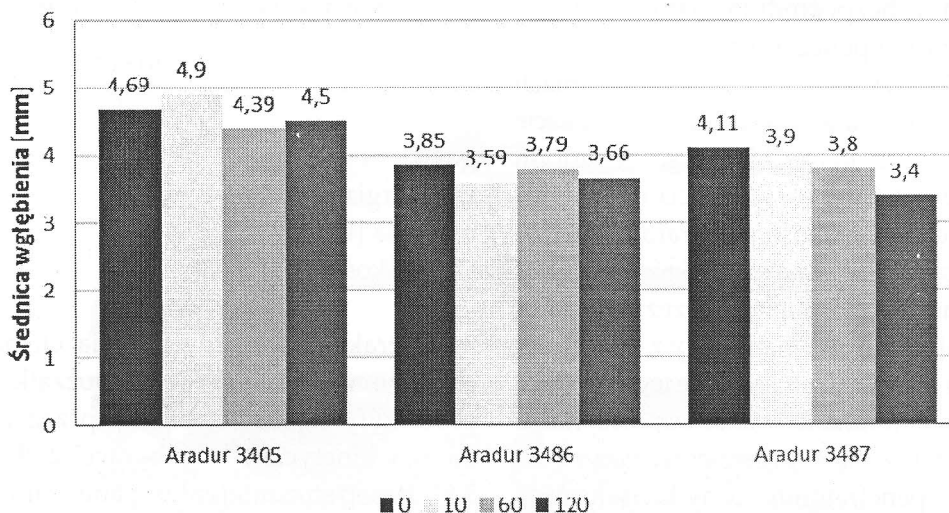
Wyniki pomiarów średnic wgłębień powstałych w wyniku uderzenia penetratora

w panel kompozytowy w zależności od energii uderzenia przedstawiono na rysunkach 5-7.

Jak można zaobserwować na przedstawionych wykresach największe średnice po stronie uderzenia penetratora obserwuje się dla próbek utwardzanych aminą polialifatyczną - Aradurem 3405. W przypadku pozostałych utwardzaczy, średnice są mniejsze. Zaobserwowane odkształcenia i uszkodzenia po stronie przeciwległej najmniejsze są dla panelu, w którym wykorzystano żywicę Araldite LY1564 sieciowaną Aradurem 3405. W tabelach 3-5 zesta-



Rys. 5. Wartości średnicy wgłębienia powstałego w panelu po uderzeniu penetratora z energią kinetyczną 2,9J
Fig. 5. Values of the cavity diameter formed after penetrator impact with 2,9J of kinetic energy



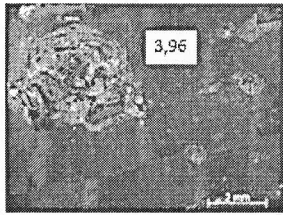
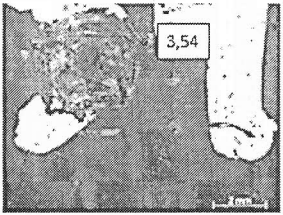
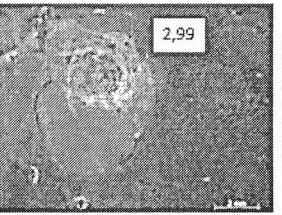
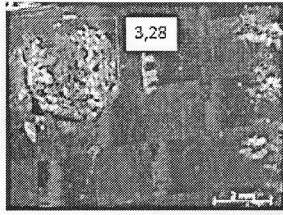
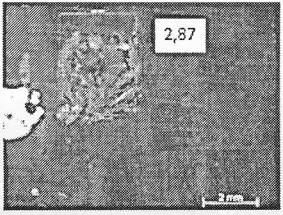
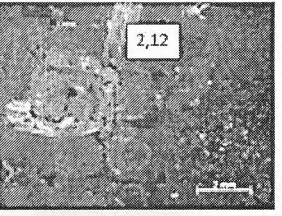
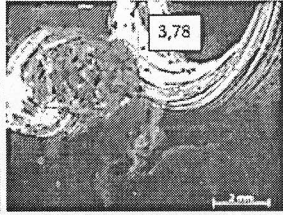
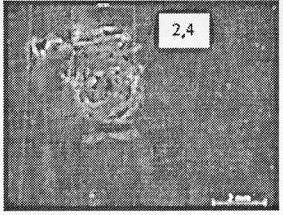
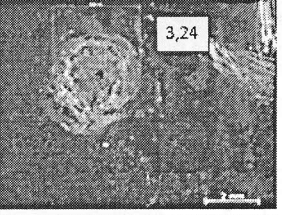
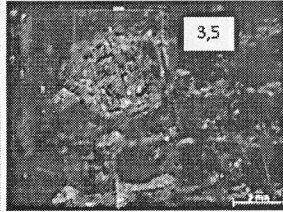
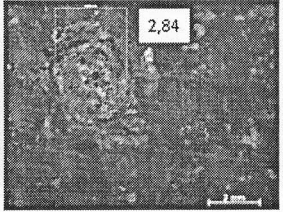
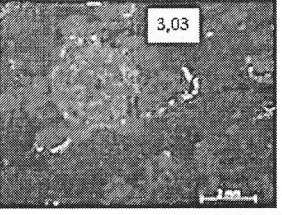
Rys. 6. Wartości średnicy wgłębienia powstałego w panelu po uderzeniu penetratora z energią kinetyczną 4,3J
Fig. 6. Values of the cavity diameter formed after penetrator impact with 4,3J of kinetic energy

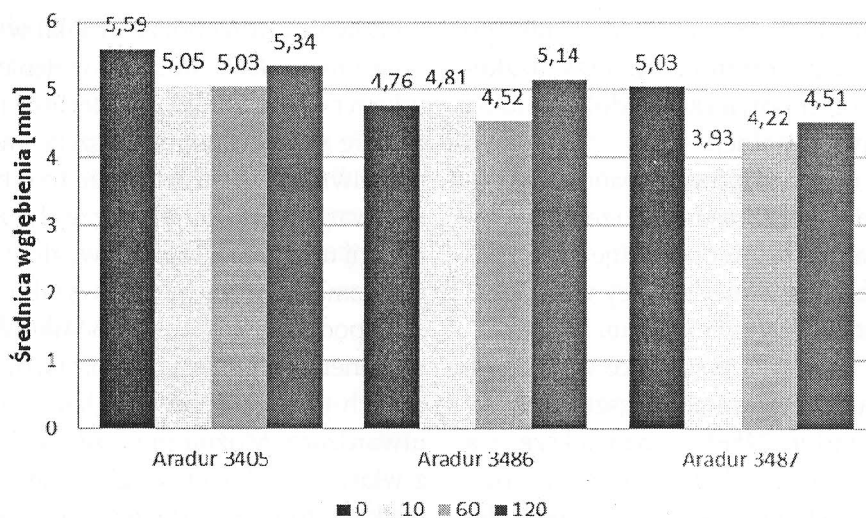
wiono obrazy uszkodzeń badanych paneli po stronie uderzenia penetratora. Analizy uszkodzenia przeciwległej powierzchni dokonano na podstawie oceny wizualnej.

Na zdjęciach mikroskopowych paneli kompozytowych poddanych procesowi starzenia przedstawionych w tabelach 3-5 obserwuje się w początkowej fazie zmniejszenie średnicy wgłębienia (10 cykli), a następnie jej zwiększenie. Można zaobserwować, że najmniejsze średnice wgłębienia odnotowano dla próbek o najmniejszej lepkości utwardzacza (Aradur 2486), a największe dla utwardzacza Aradur 3405. Warto zauważyć również to, że uszkodzenia powstałe w wyniku uderzenia penetratora są największe w zewnętrznych warstwach materiału (od strony uderzenia). Do-

datkowo zauważono, że próbki, w których zmierzono największe średnice wgłębienia od strony uderzenia penetratorem cechowały się jednocześnie najmniejszymi zniszczeniami po stronie przeciwnej. Świadczyć może to o tym, że pierwsze warstwy materiału przejęły znaczną część energii uderzenia. Włókna węglowe zastosowane do wzmocnienia paneli w wyniku uderzenia zostały poddane ścisłaniu. Dodatkowo dla największej energii uderzenia zaobserwowano pojedyncze ich pęknięcia, bez względu na zastosowany utwardzacz. Można przypuszczać, że wynika to z własności włókien węglowych i w przypadku większych energii uderzenia należałoby połączyć je w układ hybrydowy z wykorzystaniem na przykład włókien aramidowych.

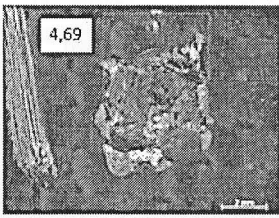
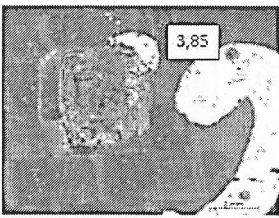
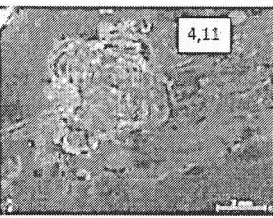
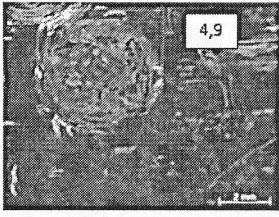
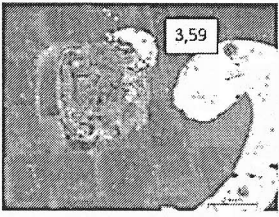
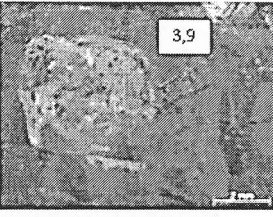
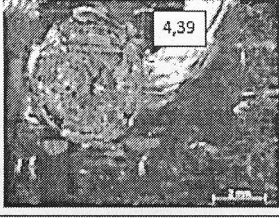
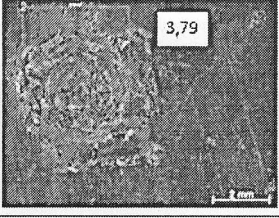
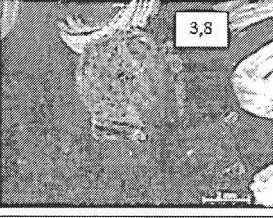
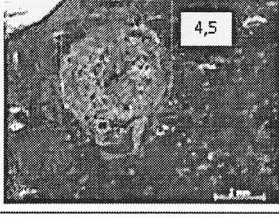
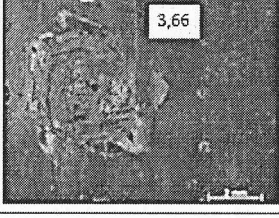
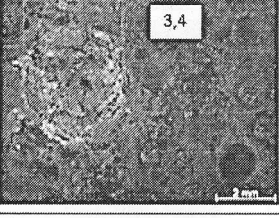
Tab. 3. Obrazy uszkodzeń badanych paneli po stronie uderzającego penetratora z energią 2,9J
Tab. 3. Views of tested panels damaged after penetrator impact with 2,9J of kinetic energy

		Aradur 3405	Aradur 3486	Aradur 3487
Ilość cykli procesu starzenia	0	 3,96	 3,54	 2,99
	10	 3,28	 2,87	 2,12
	60	 3,78	 2,4	 3,24
	120	 3,5	 2,84	 3,03


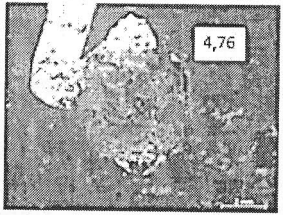
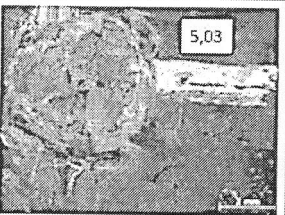
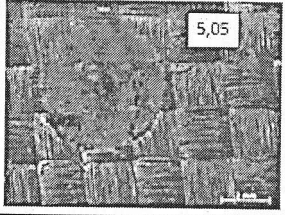
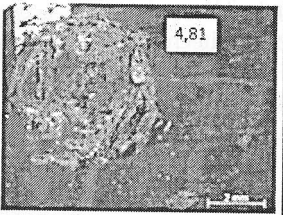
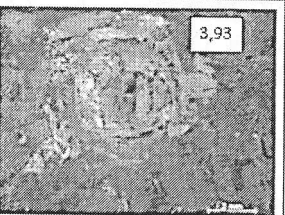
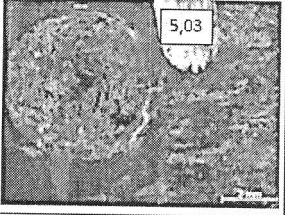
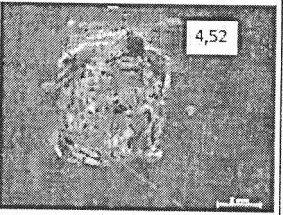
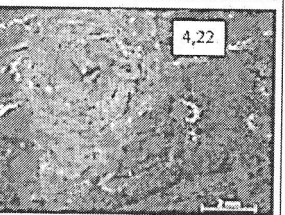
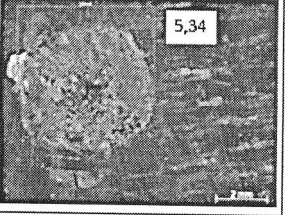
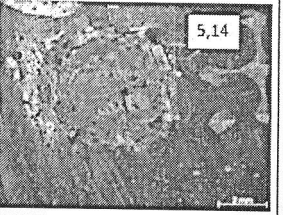
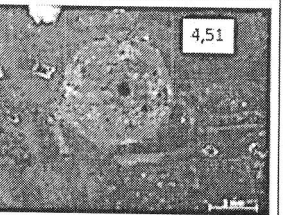


Rys. 7. Wartości średnicy wgłębienia powstałego w panelu po uderzeniu penetratora z energią kinetyczną 5,8J
 Fig. 7. Values of the cavity diameter formed after penetrator impact with 5,8J of kinetic energy

Tab. 4. Obrazy uszkodzeń badanych paneli po stronie uderzającego penetratora z energią 4,3J
 Tab. 4. Views of tested panels damaged after penetrator impact with 4,3J of kinetic energy

		Aradur 3405	Aradur 3486	Aradur 3487
Ilość cykli procesu starzenia	0	 4,69	 3,85	 4,11
	10	 4,9	 3,59	 3,9
	60	 4,39	 3,79	 3,8
	120	 4,5	 3,66	 3,4

Tab. 5. Obrazy uszkodzeń badanych paneli po stronie uderzającego penetratora z energią 5,8J
 Tab. 5. Views of tested panels damaged after penetrator impact with 5,8J of kinetic energy

		Aradur 3405	Aradur 3486	Aradur 3487
Ilość cykli procesu starzenia	0	 5,59	 4,76	 5,03
	10	 5,05	 4,81	 3,93
	60	 5,03	 4,52	 4,22
	120	 5,34	 5,14	 4,51

3. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- Starzenie laminatów węglowo – epoksydowych w warunkach szoków termicznych ma wpływ na odporność na penetrację panelu bez względu na wartość energii uderzenia.
- Panele, które wykazywały większe średnice wgłębienia po stronie uderzenia penetratora, odznaczały się mniejszymi zmianami po stronie przeciwległej. Może to być związane z pochłanianiem znacznej energii przez pierwsze warstwy panelu.
- Panel kompozytowy o osnowie sieciowanej aminą polialifatyczną (Aradur 3405) charakteryzuje się największą średnicą wgłębienia po stronie uderzenia i najmniejszym zniszczeniem po stronie przeciwległej. Można przypuszczać, że wpływ na ten efekt ma sztywność materiału. Im sztywniejszy kompozyt, tym wyższa wartość energii pochłanianej przez warstwy wierzchnie.

- Zaobserwowane pęknięcia włókien węglowych przy ich wysokich własnościach wytrzymałościowych pozwalają przypuszczać, że zastosowanie ich w układach hybrydowych podwyższy odporność na uderzenie. Należy jednak przeprowadzić badania tych materiałów w szerszym obszarze.

BIBLIOGRAFIA:

1. Jamroziak K.: *Identyfikacja własności materiałów w balistyce końcowej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
2. Fejdyś M., Łandwijt M.: *Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe*. Techniczne Wyroby Włókiennicze 2010, R.18, nr 1/2, s. 12-22.
3. Mallick P.K.: *Fiber reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. Third edition.. CRC Press, Boca 2007.
4. Harris B.: *Fatigue in composites*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge 2003.
5. Martin R.: *Ageing of composites*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge 2008.
6. Szymiczek M., Sławski S., Domin J.: *Wpływ procesu starzenia w warunkach szoków termicznych na odporność na przebicie kompozytu aramidowo-epoksydowego*. Przetwórstwo Tworzyw 2017 nr 6, s. 609-616,
7. Kroczek R., Domin J.: *Projekt pneumatycznego modułu napędowego jako zadajnika prędkości początkowej w hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej*. Zesz. Probl. Masz. Elekt. 2015 nr 108, s. 89-94
8. Domin J., Kutyna Ł.: *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
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. Dobrzański L.A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, WNT, 2002

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 18-03-2018

Data akceptacji publikacji do druku: 17-06-2018