

Poliuretanowe struktury kompozytowe z tkaninami 3D

Joanna Ryszkowska^{1), *)}, Monika Auguścik¹⁾, Milena Leszczyńska¹⁾, Kamila Mizera¹⁾, Łukasz Wierzbicki¹⁾, Tadeusz Szymczak²⁾, Piotr Lasota²⁾, Kamil Lipert³⁾, Marzena Półka⁴⁾

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.9.5](https://doi.org/10.14314/polimery.2018.9.5)

Streszczenie: Przedmiotem badań były poliuretany (PUR) zaliczane do grupy materiałów absorbujących energię, o potencjalnym zastosowaniu do wytwarzania elementów konstrukcji tarcz chroniących ratowników przed falą uderzeniową. W celu zwiększenia zdolności tych materiałów do absorpcji energii na ich bazie wykonano struktury kompozytowe z udziałem poliestrowych tkanin 3D. Do badań użyto poliuretanów o różnej twardości (40, 85 i 95 ShA). Testy udarnościowe przeprowadzono dwiema metodami z wykorzystaniem kolumnowego młota udarowego Dynatup 9250HV i stanowiska do badania zdolności do pochłaniania siły uderzenia, zbudowanego na podstawie brytyjskiej normy BS 7971-4:2002. Oceniane próbki poliuretanów o różnej twardości cechowała podobna zdolność do absorpcji energii (powyżej 82 J), natomiast kompozyty na osnowie poliuretanowej z udziałem tkaniny poliestrowej 3D akumulowały większą ilość energii uderzenia (powyżej 87 J).

Słowa kluczowe: elastomery poliuretanowe, poliestrowe tkaniny 3D, kompozyty, zdolność do absorpcji energii, młot udarowy.

Polyurethane composite structures with 3D fabrics

Abstract: Polyurethanes (PUR), which are known to exhibit energy absorption properties, have been selected for use as structural elements of the shields protecting the rescuers from the shockwaves. In order to increase the ability of these materials to absorb energy the composite structures containing polyester 3D fabrics have been prepared. Polyurethanes of various hardness (40, 85, 95 ShA) were used in the study. The impact tests were carried out with two analytical methods using Dynatup 9250HV column impact hammer and the impact energy absorption testing setup constructed with accordance to the British standard BS 7971-4:2002. The evaluated polyurethanes with different hardness exhibited similar capabilities of energy absorption (more than 82 J). Introduction of polyester 3D fabrics increased the amount of energy that could be absorbed by the examined composite structures (more than 87 J).

Keywords: polyurethane elastomers, polyester 3D fabrics, composites, energy absorption properties, impact hammer.

Materiały absorbujące energię są wykorzystywane w licznych aplikacjach w przemyśle samochodowym, lotnictwie i przemyśle maszynowym. Materiały takie są stosowane m.in. do tłumienia wibracji, podnoszenia komfortu podróży pasażerów, a także wytwarzania elementów tłumiących energię uderzenia [1, 2]. Funkcje te spełniają m.in. materiały poliuretanowe: pianki elastyczne, pianki sztywne i poliuretanowe elastomery [3–13]. W aplikacjach, w których jest konieczne tłumienie ener-

gii uderzenia wykorzystuje się też cieczy zagęszczane ścinaniem i konstrukcje pianek auksetycznych z tymi cieczami [14, 15]. Inną metodą umożliwiającą zwiększenie zdolności materiałów poliuretanowych do absorpcji energii jest wytwarzanie poliuretanowych kompozytów. Szeroko prowadzone badania mają na celu wyjaśnienie wpływu orientacji włókien, oddziaływania między warstwami laminatu czy sposobu przygotowania poszczególnych warstw na zdolność do absorpcji energii wytwarzanych kompozytów [16, 17]. Wysoką zdolność do tłumienia energii wykazują kompozyty poliuretanowe z włóknami węglowymi i szklanymi. Materiały te cechują się większą sztywnością niż większość elastomerów poliuretanowych [18, 19]. Autorzy Crane, Ratcliffe i Santiago przeprowadzili szczegółową analizę zdolności do tłumienia energii przez kompozyty poliuretanowe z udziałem rozmaitych włókien ułożonych w różny sposób [18, 19]. Badania opisane przez Crane i współpr. [20] pozwoliły przypuszczać, że zwiększeniu zdolności

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa.

²⁾ Instytut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa.

³⁾ ASMA Polska Sp. z o.o., ul. Mostów 10, Wola Ducka, 05-408 Glinianka.

⁴⁾ Szkoła Główna Służby Pożarniczej, ul. Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa.

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: ryszkowska.joanna@o2.pl

do tłumienia energii przez kompozyty sprzyjają mikro-warstwy powstające na granicach osnowy i włókien.

Innym sposobem na poprawę zdolności do pochłaniania energii przez materiały poliuretanowe jest zastosowanie technicznych dystansowych tkanin tekstylnych 3D (ang. *warp-knitted spacer fabrics*, WSF) [21, 22], które w wielu aplikacjach mogą być także alternatywą dla włókien szklanych i węglowych [23]. Materiały z udziałem tkanin 3D mogą być wykorzystywane w przemyśle samochodowym, opakowalnictwie, budownictwie i w produkcji innych dóbr konsumpcyjnych. Tkaniny WSF stanowią konstrukcje 3D złożone z dwóch oddzielnych warstw tkanin z giętkich włókien tekstylnych, połączonych ze sobą niemi dystansowymi, przędzą runową lub warstwą tkaniny [24]. Materiały te są otrzymywane z różnych typów włókien: węglowych, poliamidowych, poliestrowych, szklanych lub aramidowych [23]. Cechuje je większa sprężystość niż typowych tkanin tekstylnych [25]. Tkaniny WSF o małej gęstości z udziałem włókien szklanych, aramidowych lub węglowych wykazują dużą wytrzymałość na ściskanie i duży moduł sprężystości [26]. Tkaniny techniczne mogą mieć różną strukturę, różny splot (kąt nachylenia włókien) i grubość, w zależności od wymagań danej aplikacji. Wielu badaczy analizowało wpływ struktury tkanin dystansowych na wytrzymałość na ściskanie kompozytów na osnowie z nienasyconych żywic poliestrowych [27–31]. Chen i współpr. [28] opisali wyniki badań dotyczących struktur kompozytowych otrzymanych z elastycznych pianek poliuretanowych z polietylenowymi tkaninami 3D, różniącymi się budową warstw zewnętrznych, średnicą włókien w przestrzeni dystansującej warstwy zewnętrznej, układem włókien (kątem załamania) oraz ich grubością. W publikacji [32] Chen i współpr. przedstawili wyniki badań struktur kompozytowych z tkaninami z poli(tereftalanu etyleny) (PET) na osnowie z półsztywnych pianek poliuretanowych.

Celem naszej pracy było otrzymanie kompozytów absorbujących energię, przeznaczonych do zastosowania na rdzenie konstrukcji tarcz dla strażaków, oraz określenie wpływu składu takich kompozytów na ich wybrane właściwości fizykomechaniczne. Kompozyty wytworzono na osnowie z elastomerów poliuretanowych (EPUR) z dystansową tkaniną 3D wykonaną z PET. Osłony rdzeni konstrukcji tarcz wykonano z materiałów ognioochronnych, zabezpieczających je przed działaniem ognia. Tar-

cze mają służyć do ochrony ratowników przed falą uderzeniową i ogniem. Obecnie strażacy nie dysponują tego typu zabezpieczeniami.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

Kompozyty otrzymywano z komercyjnych systemów poliuretanowych wytwarzanych przez firmę ASMA Polska (tabela 1):

- Asmaprene L 95 ShA z diizocyjanianu toluilenu (TDI) i polieterodiolu,
- Asmaprene BE 40 ShA z TDI i poliestrodioli,
- Asmaprene Q 85 ShA z diizocyjanianu difenylo-
metanu (MDI) i poliestrodiolu.

Jako zbrojenie kompozytów zastosowano wykonaną z PET tkaninę dystansową 3D dostarczoną przez firmę Baltex o masie 1000 g/m² i grubości 12 mm (rys. 1).

Rdzenie tarcz dla strażaków, wytworzone z elastomerów poliuretanowych lub ich kompozytów, powinny być zabezpieczone osłoną o zwiększonej odporności termicznej. Takie zabezpieczenie wykonano z tkaniny szklanej IBTS-940-HT glass poddanej dodatkowej obróbce termicznej zwiększającej jej odporność cieplną do 700 °C. Wnętrze konstrukcji wykonano z płyty poliuretanu APL95 o grubości 12 mm. Oceniano wpływ konstrukcji struktury kompozytowej z udziałem tkaniny szklanej na zdolność do absorpcji energii uderzenia (rys. 2).

Otrzymywanie poliuretanów i kompozytów

Substraty do wytworzenia poliuretanów mieszano z zastosowaniem głowicy mieszającej. Mieszanke odlewano do formy o wymiarach 18 × 18 cm i wysokości 16 cm. Po upływie 15 min wygrzewania w formie o temp. 80 °C odlew wyjmowano z formy i następnie wygrzewano w piecu w temp. 80 °C przez 16 h. W wypadku odlewania kompozytów tkaninę umieszczano w formie, do formy wlewano odważoną ilość wymieszanej za pomocą głowicy mieszanki substratów, wystarczającą do przesylenia 83 % lub 100 % objętości tkaniny. Mieszanka substratów grawitacyjnie wypełniała strukturę tkaniny. Po upływie 15 min wygrzewania w formie w temp. 80 °C kształtkę wyjmowano z formy i wygrzewano ją w piecu w temp. 80 °C przez 16 h (tabela 2).

Tabela 1. Charakterystyka używanych do badań poliuretanów (wg danych producenta)

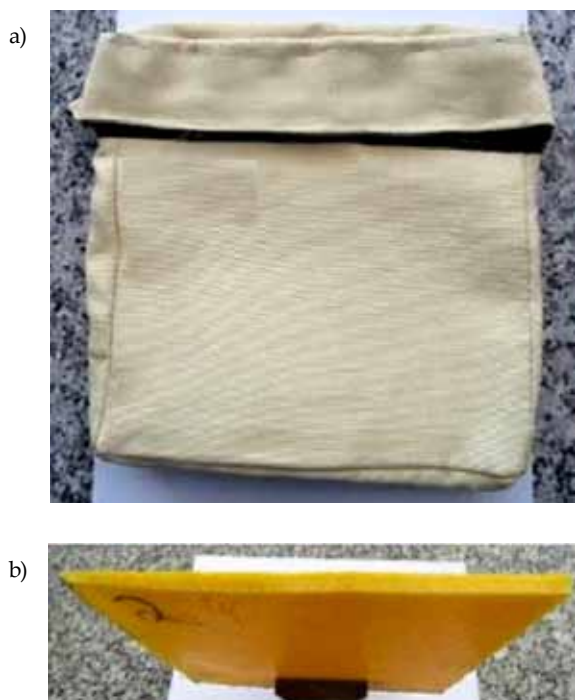
T a b l e 1. Characteristics of polyurethane elastomers used in the study (according to manufacturer's data)

Poliuretan	Norma	Asmaprene L 95 (APL95)	Asmaprene BE 40 (APBE40)	Asmaprene Q 85 (APQ85)
Twardość Shore A, ShA	DIN 53505	95	40	85
Wytrzymałość na rozciąganie, N/mm ²	DIN 53505	50	10	50
Wydłużenie przy zerwaniu, %	DIN 53505	360	1280	580
Gęstość, g/cm ³		1,13	1,17	1,25



Rys. 1. Tkanina dystansowa 3D zastosowana do wytwarzania kompozytów

Fig. 1. Picture of the 3D spacer fabric used in the composite preparation



Rys. 2. Elementy struktury kompozytowej: a) osłona z tkaniny szklanej, b) płyta z elastomeru APL95

Fig. 2. Elements of the composite structure: a) cover from glass fabric, b) plate from APL95 elastomer

T a b e l a 2. Charakterystyka wytworzonych materiałów
T a b l e 2. Characteristics of the prepared materials

Symbol próbki	Tkanina	Przesycenie tkaniny % obj.	Gęstość kompozytu g/cm ³
APL95	–	–	1,1096 ± 0,0021
APL95+3D_83	PET	83	1,0915 ± 0,0083
APL95+3D_100	PET	100	1,1145 ± 0,0037
APBE40	–	–	1,1902 ± 0,0018
APBE40+3D_83	PET	83	1,2016 ± 0,0069
APBE40+3D_100	PET	100	1,1947 ± 0,0018
APQ85	–	–	1,2258 ± 0,0007
APQ85+3D_83	PET	83	0,9493 ± 0,0451
APQ85+3D_100	PET	100	0,7964 ± 0,0061

Metodyka badań

– Gęstość określano metodą Archimedes, zgodnie z normą PN-C-04215:1983, z wykorzystaniem wagi analitycznej firmy RADWAG z przystawką do pomiaru gęstości.

– Strukturę kruchych przełomów wytworzonych kompozytów obserwowano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego SEM Hitachi TM3000, w warunkach napięcia przyspieszającego równego 15 keV. Przed obserwacją próbki napyłano złotem przy użyciu napyłarki Polaron SC7640 przez 80 s przy natężeniu prądu 7 mA.

– Testy udarnościowe prowadzono w temperaturze pokojowej z zastosowaniem kolumnowego młota udarowego Dynatup 9250HV. Próbkę pozycjonowano na płycie badawczej pełnej. Stosowano bijak w postaci krążka o średnicy 74 mm (rys. 3).



Rys. 3. Próbkę elastomeru w strefie badawczej młota z zastosowanym w badaniach bijakiem

Fig. 3. Elastomer sample mounted in the hammer analysis chamber with the hammer used in the study

– Zdolność pochłaniania energii uderzenia oceniano zgodnie z brytyjską normą BS 7971-4:2002. Szczegółowy opis badania przedstawiono w pracy Ryszowskiej i wspólr. [33].

Zdolność do absorpcji energii (A) obliczano wg wzoru (1):

$$A = \frac{Ab - Ap}{Ab} \cdot 100 \% \quad (1)$$

gdzie: Ab – energia obliczana po uderzeniu bijakiem w stolik urządzenia, Ap – energia obliczana po uderzeniu bijakiem w próbkę.

Stabilność zdolności do absorpcji energii uderzenia (A_{st}) oznaczano na podstawie pomiaru absorpcji uderzenia po trzykrotnym uderzeniu w to samo miejsce próbki wg wzoru (2):

$$A_{st} = \frac{\left(\frac{Ab - Ap3}{Ab} \right)}{A} \cdot 100 \% \quad (2)$$

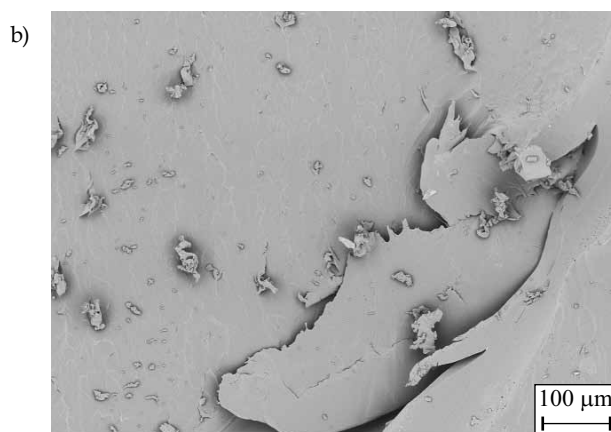
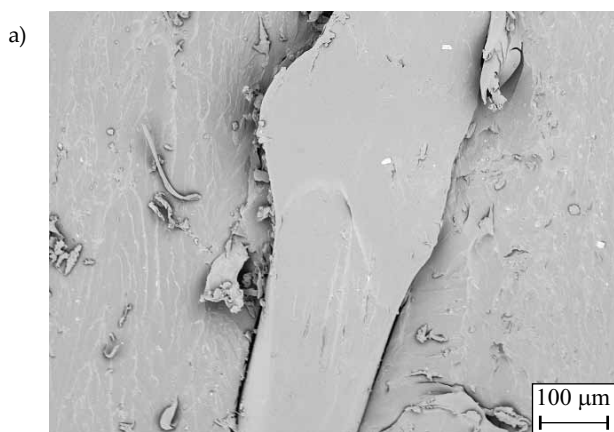
gdzie: $Ap3$ – energia obliczana po trzykrotnym uderzeniu w próbkę.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Wyniki oznaczenia gęstości kompozytów zestawiono w tabeli 2. Gęstość próbek kompozytów na bazie poliuretanu APL95 i APBE40 jest podobna do gęstości poliuretanu stanowiącego ich osnowę. Gęstość kompozytów z poliuretanem APQ85 jest natomiast znacznie mniejsza niż gęstość elastomeru osnowy, a w wypadku kompozytu, w którym tkanina jest przesycona w 100 %, jest mniej-

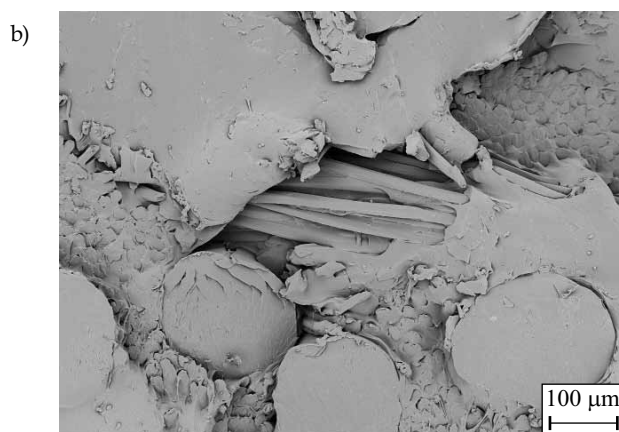
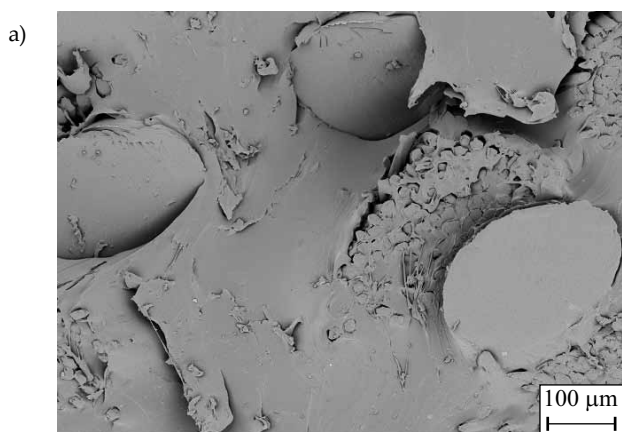
sza o 35 %. Wynik ten wskazuje na znaczną porowatość uzyskanego kompozytu.

Strukturę kruchych przełomów kompozytów obrazują mikrofotografie SEM (rys. 4, 5 i 6). Kruchy przełom próbek kompozytu na osnowie elastomeru o największej twardości – APL95 (rys. 4) ma odmienny charakter niż kruchy przełom próbki na osnowie poliuretanu o najmniejszej twardości – APBE40 (rys. 5). Różnice te wskazują, że w wypadku próbek kompozytów na osnowie o większej



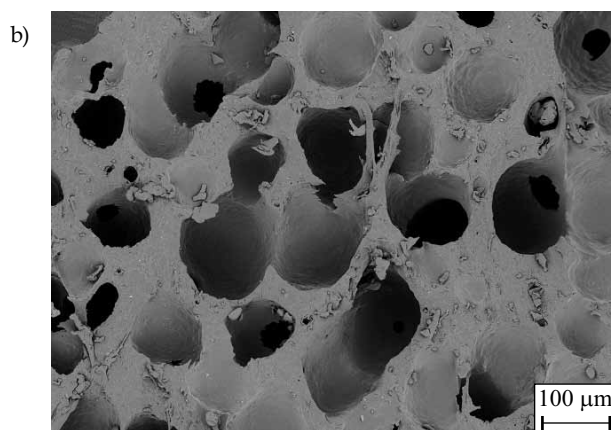
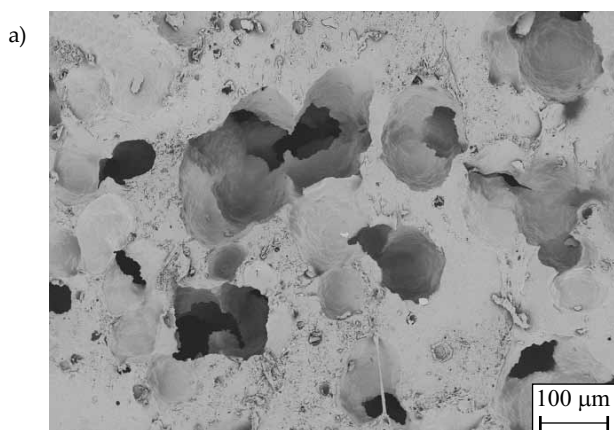
Rys. 4. Mikrofotografia SEM kruchego przełomu kompozytu: a) APL95+3D_83, b) APL95+3D_100

Fig. 4. SEM images of the fragile fracture of composite: a) APL95+3D_83, b) APL95+3D_100



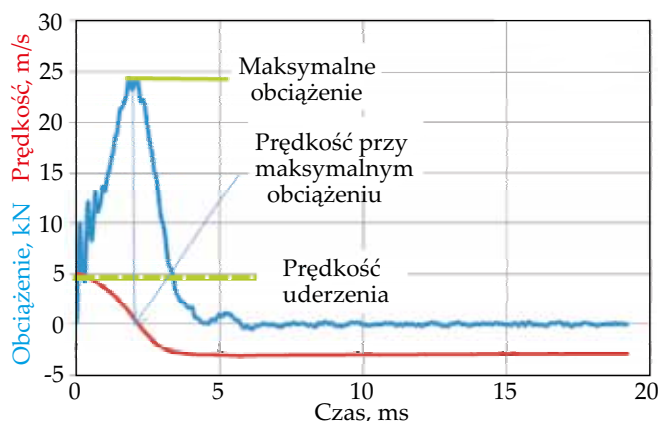
Rys. 5. Mikrofotografia SEM kruchego przełomu kompozytu: a) APBE40+3D_83, b) APBE40+3D_100

Fig. 5. SEM images of the fragile fracture of the composite: a) APBE40+3D_83, b) APBE40+3D_100



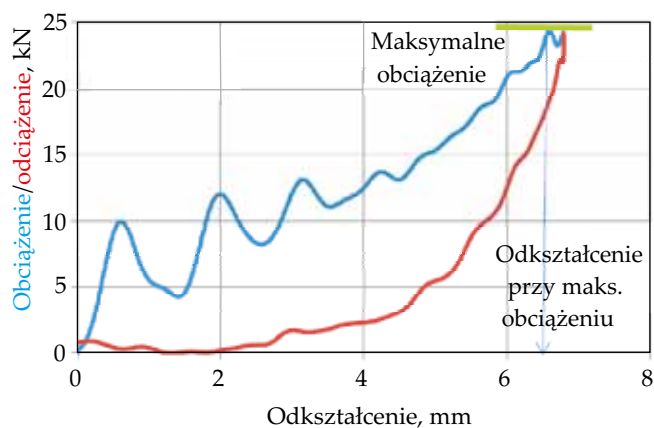
Rys. 6. Mikrofotografia SEM kruchego przełomu kompozytu: a) APQ85+3D_83, b) APQ85+3D_100

Fig. 6. SEM images of the fragile fracture of the composite: a) APQ85+3D_83, b) APQ85+3D_100



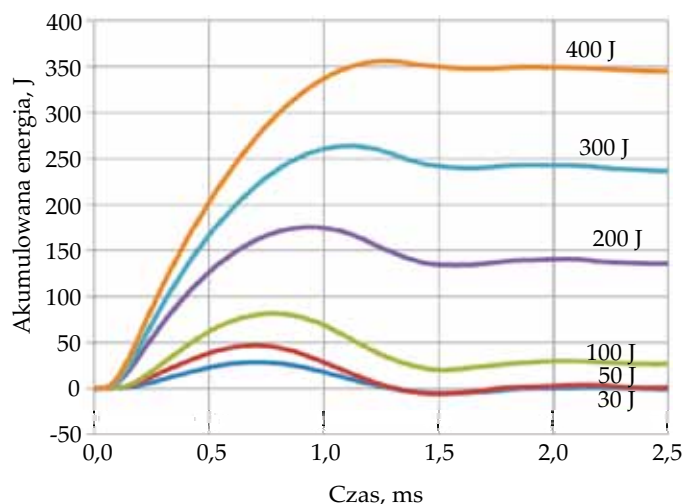
Rys. 7. Przykładowe krzywe zmian obciążenia i prędkości odkształcania w funkcji czasu próbki APBE40 uderzanej młotem z energią bijaka 100 J

Fig. 7. Exemplary curves of stress and deformation rates as functions of time for the sample APBE40 impacted with a hammer at impact energy of 100 J



Rys. 8. Krzywa zmian obciążenia w funkcji odkształcenia próbki APBE40 uderzanej młotem z energią bijaka 100 J

Fig. 8. Stress curve as a function of the strain for the sample APBE40 impacted with a hammer at impact energy of 100 J



Rys. 9. Krzywe zmian obciążenia w funkcji odkształcenia próbki APL95 uderzanej młotem z różną energią bijaka

Fig. 9. Stress curves as functions of the strain for the sample APL95 impacted with hammers with various impact energies

twardości uzyskano lepszą adhezję między elastomerem a PET (rys. 4). W wypadku próbek kompozytów na osnowie o małej twardości (APBE40) na przełomach próbek wyraźnie uwidacznia się struktura tkaniny 3D. Próbka z poliuretanu APQ85 cechuje się natomiast dużą porowatością. Trudności z wypełnieniem metodą grawitacyjną porów tkaniny 3D wytworzonej z PET w wypadku tego poliuretanu są prawdopodobnie spowodowane większą lepkością mieszanki w chwili jej odlewania.

Analizowano wyniki badań elastomerów i ich kompozytów z zastosowaniem młota rzutowego. Rejestrowano zmianę siły ściskającej próbkę, prędkość bijaka, absorbowaną przez próbkę energię w funkcji czasu (rys. 7) oraz wielkość odkształcenia (ugięcia) próbki (rys. 8). Rysunki 7 i 8 przedstawiają sposób wyznaczania charakterystycznych wielkości opisujących cechy badanych materiałów. Początek krzywej odpowiada chwili kontaktu próbki i bijaka spadającego z prędkością 5 m/s. Prędkość bijaka zmniejsza się aż do osiągnięcia przez próbkę maksymalnego obciążenia przy maksymalnym odkształceniu. Następnie bijak przemieszcza się do góry, a próbka się odpręża, zmniejsza się siła działająca na próbkę, prędkość przybiera wartości ujemne [34]. Podczas przebiegu tych procesów zwiększa się ilość zaabsorbowanej przez próbkę energii. W odniesieniu do analizowanych materiałów założono, że absorbowanej energii odpowiada maksimum na krzywej zależności zaabsorbowanej energii w funkcji czasu. Przyjmuje się, że pik maksimum obciążenia określa energię zaabsorbowaną przez materiał i użytą na odkształcenie elastyczne materiału.

Analizowano też zmiany absorpcji energii przez elastomer APL95 w warunkach różnej energii bijaka: 30, 50, 100, 200, 300 i 400 J (rys. 9). Wyniki badań potwierdziły, że większej energii uderzenia odpowiada większa ilość zaabsorbowanej energii i większe odkształcenie próbki, dłuższy jest również czas upływający do chwili osiągnięcia maksymalnej ilości zaabsorbowanej energii. Wyniki analizy krzywych uzyskanych w toku badań z zastosowaniem energii bijaka 100 J zestawiono w tabeli 3.

Maksymalna siła uderzenia, jaką przejmują badane materiały (F_{maks}) zmienia się wraz z twardością elastomerów, im większa jest ich twardość, tym większą siłą przejmują. Czas do chwili, gdy materiał przejmuje maksymalną siłę uderzenia (t) mieści się w zakresie 0,7–3,6 ms. Wszystkie analizowane kompozyty pochłaniają znaczne ilości energii (E_{maks}) 72–88 %. W wypadku kompozytów APL95 z udziałem tkaniny 3D ich zdolność do absorpcji zwiększa się o ok. 9 % i wynosi ok. 88 J. Kompozyty na bazie APBE40 pochłaniają ok. 5 % więcej energii niż elastomer osnowy, a kompozyty na bazie APQ85 – o ok. 24 % więcej. Największą poprawę zdolności do absorpcji energii zaobserwowano w wypadku kompozytów o mikroporowatej strukturze. Zwiększenie zdolności do absorpcji energii kompozytów z udziałem tkanin 3D może być skutkiem tworzenia się mikrowarstw na granicy osnowa-napełnienie, tak jak sugerowano w pracy Crane'a i współpr. [20].

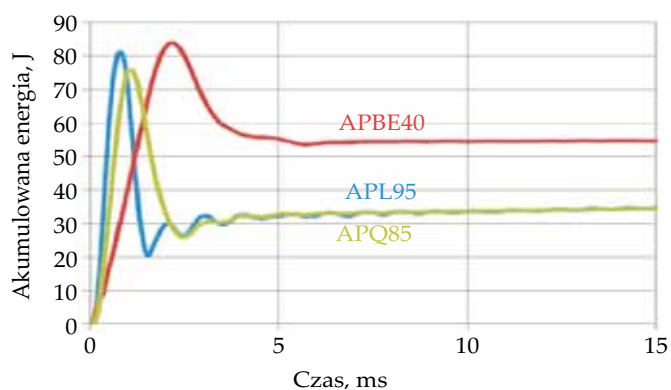
T a b e l a 3. Zestawienie wyników badań uderności poliuretanów i ich kompozytów przy uderzeniu młotem z energią bijaka 100 J oraz badań zdolności do absorpcji energii wg normy BS 7971-4:2001

T a b l e 3. Summary of the results of the impact tests of polyurethane elastomers and their composites impacted with a hammer at impact energy of 100 J and analysis of energy absorption according to BS 7971-4:2001

Symbol próbki	F_{maks} , kN	t , ms	E_{maks} , J	U_{maks} , %	A , %	Ast , %
APL95	> 57,0	0,77	81,3	17	34	103
APL95+3D_83	43,4	1,29	88,1	32	32	99
APL95+3D_100	> 54,0	0,75	87,6	20	67	97
APL95 SK	> 53,0	1,12	87,6	31	40	100
APBE40	23,5	2,00	83,7	49	45	100
APBE40+3D_83	57,4	2,00	84,1	65	47	96
APBE40+3D_100	30,9	0,89	87,2	38	60	99
APQ85	44,8	0,96	72,1	23	49	99
APQ85+3D_83	> 57,0	3,60	88,3	98	44	90
APQ85+3D_100	31,2	1,90	86,2	45	61	98

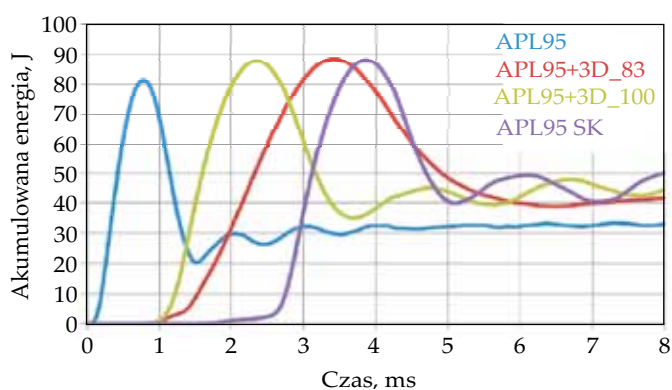
F_{maks} – maksymalna siła przejmowana przez materiały, t – czas do osiągnięcia F_{maks} , E_{maks} – energia pochłonięta w trakcie uderzenia, U_{maks} – maksymalne ugięcie próbki, A – zdolność do absorpcji energii, Ast – stabilność zdolności do pochłaniania energii.

F_{maks} – maximum force absorbed by materials, t – time to reach F_{maks} , E_{maks} – energy absorbed during the impact, U_{maks} – maximum sample deflection, A – energy absorption ability, Ast – stability of energy absorption ability.



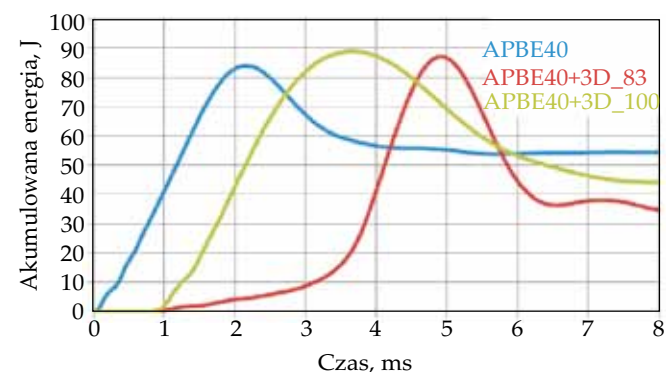
Rys. 10. Energia akumulowana przez próbki poliuretanów po uderzeniu młotem z energią bijaka 100 J

Fig. 10. Energy accumulated by polyurethane samples impacted with a hammer at impact energy of 100 J



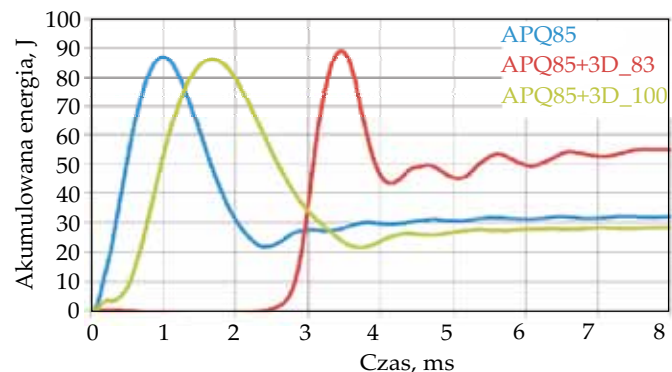
Rys. 11. Energia akumulowana przez próbki: poliuretanu APL95, jego kompozytów i struktury kompozytowej (APL95 SK) po uderzeniu młotem z energią bijaka 100 J

Fig. 11. Energy accumulated by samples of APL95 elastomer, its composites and composite structure (APL95 SK) impacted with a hammer at impact energy of 100 J



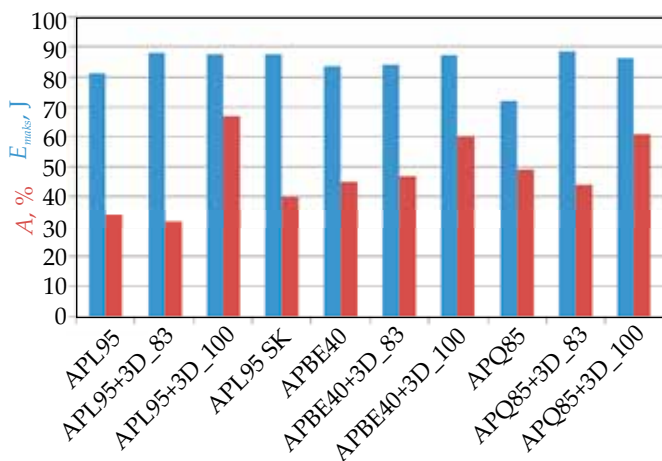
Rys. 12. Energia akumulowana przez próbki poliuretanu APBE40 i jego kompozytów po uderzeniu młotem z energią bijaka 100 J

Fig. 12. Energy accumulated by samples of APBE40 elastomer and its composites impacted with a hammer at impact energy of 100 J



Rys. 13. Energia akumulowana przez próbki poliuretanu APQ85 i jego kompozytów po uderzeniu młotem z energią bijaka 100 J

Fig. 13. Energy accumulated by samples of APQ85 elastomer and its composites impacted with a hammer at impact energy of 100 J



Rys. 14. Porównanie akumulowanej energii i zdolności do absorpcji energii przez próbki poliuretanów i ich kompozytów
 Fig. 14. Comparison of energy accumulated and energy absorption properties for the samples of polyurethane elastomers and their composites

Ze względu na potencjalną aplikację opracowywanych materiałów niezwykle ważna jest wartość ugięcia próbki (U_{maks}). Im mniejsze ugięcie, tym większe bezpieczeństwo ratowników – użytkowników osłon wytwarzanych z udziałem badanych kompozytów. Najmniejsze ugięcie wykazywały próbki elastomerów, a także kompozyty na podstawie poliuretanu APL95.

Stwierdzono, że im mniejsze ugięcie próbki, tym materiał wykazuje lepsze właściwości tłumiące. Zależność tę potwierdzili wcześniej Lisiecki i współpracownicy [34]. Na rys. 10 porównano wartości energii akumulowanej przez próbki PUR o różnej twardości. Wyniki badań wskazują, że zdolność do absorpcji energii zależy nie tylko od twardości materiałów, ale także od ich budowy chemicznej. Wpływ udziału tkaniny 3D i sposobu jej przesylenia na zdolność do absorpcji energii badanych materiałów (oznaczoną na podstawie udarności) przedstawiono na rys. 11, 12 i 13.

Drugą metodą określania zdolności do absorpcji energii jest zastosowanie małej energii uderzenia (5 J). Pomiar zdolności do absorpcji energii (A) prowadzono zgodnie z normą BS 7971-4:2002. Na podstawie wyników uzyskanych na drodze trzykrotnego pomiaru oceniano też stabilność zdolności do pochłaniania energii (Ast , tabela 3). Zdolność do absorpcji energii przez elastomery mieści się w przedziale 32–67 %, jest znacznie większa niż wartości A pianek pólstyrenowych, wynosząca 12–19 % [33]. Wszystkie analizowane materiały wykazują dużą stabilność zdolności do absorpcji energii (powyżej 90 %), co świadczy o tym, że po trzykrotnym uderzeniu nie zmienia się w sposób istotny budowa tych materiałów. W wypadku wielu struktur, np. wykonanych ze sztywnych pianek poliuretanowych używanych do ochrony przed uderzeniem, już po pierwszym uderzeniu dochodzi do ich niszczenia. Zdolność do absorpcji energii kompozytów z udziałem tkaniny 3D przesyconej elastomerem w 83 % objętości zmniejsza się nieznacznie w porównaniu z wartością A elastomerów. Natomiast

w wypadku zastosowania tkaniny 3D przesyconej całkowicie obserwuje się zwiększenie zdolności do absorpcji energii, największe w odniesieniu do struktur na bazie elastomeru APL95. Zastosowanie osłony z tkaniny szklanej powoduje zwiększenie zdolności elastomeru do absorpcji energii o 6 %. Na rys. 14 zestawiono wartości energii akumulowanej po uderzeniu młotem z energią bijaka 100 i 5 J. Stwierdzono, że ocena zdolności materiałów do absorpcji energii wg wspomnianej normy wskazuje na większe zróżnicowanie tej właściwości materiałów poliuretanowych, w zależności od rodzaju zastosowanego elastomeru i stopnia przesylenia tkaniny 3D elastomerem. Znaczne różnice w wynikach analizy prowadzonej różnymi metodami także są efektem zastosowania różnej energii młota udarowego (5 J i 100 J).

PODSUMOWANIE

Przedstawiono wyniki badań elastomerów komercyjnych o różnej twardości oraz ich kompozytów z poliuretanową tkaniną 3D. Tkaninę 3D przesycono elastomerem w 83 i 100 % jej objętości. Wytworzone materiały są przeznaczone do zastosowania jako rdzenie konstrukcji tarcz dla strażaków. Osłonę rdzeni mają stanowić różne tkaniny o zwiększonej odporności termicznej, w tym tkaniny szklane.

Zdolność do absorpcji energii przez wytworzone elastomery i ich kompozyty oceniano dwiema metodami, stosując młot udarowy o energii uderzenia 100 lub 5 J. Stwierdzono, że udział w kompozycie tkaniny 3D zwiększa zdolność do absorpcji energii elastomerów poliuretanowych o różnej twardości. W największym stopniu energię absorbują kompozyty z udziałem tkaniny 3D w całości przesyconej elastomerem. Kompozyt elastomeru o twardości 95 ShA wykazuje większą zdolność do absorpcji energii, o 97 %, o twardości 40 ShA – o 33 %, a mikroporowata struktura elastomeru o twardości 85 ShA – o 24 % niż bazowe elastomery. Maksymalną wartość absorbowanej energii kompozyty osiągają po czasie dłuższym niż elastomery osnowy.

Zweryfikowano także wpływ osłon z tkaniny szklanej na zdolność do absorpcji energii przez konstrukcję z elastomeru i tkaniny 3D. Stwierdzono, że zastosowanie konstrukcji z osłoną z tkaniny szklanej zwiększa o ok. 6 % zdolność do absorpcji energii przez kompozyt elastomeru z tkaniną 3D.

LITERATURA

- [1] Sharma A., Peel L.D.: "Vibration damping of flexible and rigid polyurethane composites", SAMPE 2004 Symposium and Exhibition, 16–20 May 2004, Long Beach, CA, United States.
https://www.researchgate.net/publication/242213988_VIBRATION_DAMPING_OF_FLEXIBLE_AND_RIGID_POLYURETHANE_COMPOSITES (data dostępu 15.11.2017)

- [2] Goods S.H., Neuschwanger C.L., Henderson C., Skala D.M.: "Mechanical properties and energy absorption characteristics of a polyurethane foam", SAND97-8490, March 1997.
[https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/485941/](https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/485941) (data dostępu 15.11.2017)
- [3] Raspet R., Griffiths S., Powers J. i in.: "Attenuation of blast waves using foam and other materials", USA-CERL technical manuscript N-89/01, US Army Corps of Engineers, 1988.
- [4] Raspet R., Butler P.B., Jahani F.: *Applied Acoustics* **1987**, 22, 243.
[http://dx.doi.org/10.1016/0003-682X\(87\)90042-9](http://dx.doi.org/10.1016/0003-682X(87)90042-9)
- [5] Borisov A.A., Gelfand B.E., Kudimov V.M. i in.: *Acta Astronautica* **1978**, 5, 1027.
[http://dx.doi.org/10.1016/0094-5765\(78\)90007-3](http://dx.doi.org/10.1016/0094-5765(78)90007-3)
- [6] Kitagawa K., Yasuhara M., Takayama K.: *Shock Waves* **2006**, 15, 437.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00193-006-0042-1>
- [7] Woodfin R.L.: "Using rigid polyurethane foams (RPF) for explosive blast energy absorption in applications such as anti-terrorist defenses", Sandia report SAND2000-0958, 2000.
- [8] Gelfand B.E., Gubanov A.V., Timofeev E.I.: *Fizika Gorennya i Vzryva* **1981**, 17, 129.
- [9] Komissarov P.V., Borisov A.A., Sokolov G.N., Lavrov V.V.: *Journal of Physics: Conference Series* **2016**, 751, 01020.
- [10] Szycher M.: "Szycher's Handbook of Polyurethanes", CRS Press, Boca Raton, 1999.
- [11] Prociak A., Rokicki G., Ryszkowska J.: „Materiały poliuretanowe”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2014.
- [12] Lisiecki J., Błażejewicz T., Kłysz S., Gmurczyk G.: *Modelowanie inżynierskie* **2011**, 42, 241.
- [13] Li Y., Zeng C.: *Polymer* **2016**, 87, 98.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2016.01.076>
- [14] Gibson L.J., Ashby M.F.: "Cellular Solids: Structure and Properties, Second edition", Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 1997.
- [15] Nakonieczna P., Wierzbicki Ł., Śladowska B. i in.: *Composites Theory and Practice* **2017**, 17, 67.
- [16] Finegan I.C., Gibson R.F.: *Composite Structures* **1999**, 44, 89.
[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(98\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(98)00073-7)
- [17] Chandra R., Singh S.P., Gupta K.: *Composite Structures* **1991**, 46, 41.
[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(99\)00041-0](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(99)00041-0)
- [18] Ratcliffe C.P., Crane R.M., Santiago A.L.: "Fiber Reinforced Polyurethane Composites: Shock Tolerant Components with Particular Emphasis on Armor Plating", Winter Annual Meeting ASME 1995, San Francisco 1995, CA, ASME – Applied mechanics division – publication – AMD **1995**, 211, str. 29–38.
- [19] Crane R.M., Ratcliffe C.P.: "Graphite/Polyurethane Flexible Composites: Mechanical and Vibration Damping Properties", "Survivability, Structures and Materials Directorate Research and Development Report", CARDIVNSWC-TR-601-93/02, July 1993, str. 57.
- [20] Crane R.M., Santiago A.L., Ratcliffe C.P.: "Structural and Damping Characteristics of a Flexible Composite Structure", "Materials for Noise and Vibration Control", Winter Annual Meeting ASME 1994, NCA-18, DE-80, 1994, str. 65–72.
- [21] Lu Q.S., Sun L.H., Yang Z.G.: *Composites Part A* **2010**, 41, 997.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.04.005>
- [22] Qian J., Miao X.H., Shen Y.: *Journal of Northwest University* **2012**, 42, 25.
- [23] Ashir M., Sennewald C., Hoffmann G., Cherif C.: *Fibers & Textiles in Eastern Europe* **2017**, 25 (121), 49.
<http://dx.doi.org/10.5604/12303666.1227882>
- [24] Włodarczyk B., Kowalski K.: *Fibres & Textiles in Eastern Europe* **2014**, 22 (103), 68.
- [25] Chen S., Long H.R.: *Industria Textila* **2014**, 65, 200.
- [26] Flemming M., Ziegmann G., Roth S.: "Faserverbundbauweisen: Faser und Matrices", Heidelberg: Springer Verlag, Berlin 1995.
- [27] Janouchova K., Heller L., Vysanska M.: *AUTEX Research Journal* **2012**, 12 (2), 34.
<http://dx.doi.org/10.2478/v10304-012-0007-7>
- [28] Chen S., Long H.R., Liu Y.H., Hu F.C.: *AUTEX Research Journal* **2015**, 15 (2), 127.
<https://doi.org/10.2478/aut-2014-0045>
- [29] Daniel I.M., Luo J.J., Schubel P.M.: *Composites Part B* **2008**, 39 (1), 13.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.02.002>
- [30] Liu W., Sun B., Hu H., Gu B.: *Polymer Composites* **2007**, 28 (2), 224.
<https://doi.org/10.1002/pc.20248>
- [31] Döbrich O., Gereke T., Cherif C.: *AUTEX Research Journal* **2014**, 14 (1), 28.
<https://doi.org/10.2478/v10304-012-0047-z>
- [32] Chen S., Zhang X., Chen H., Gao X.: *AUTEX Research Journal* **2017**, 17 (3), 199.
<https://doi.org/10.1515/aut-2016-0010>
- [33] Ryszkowska J., Leszczyńska M., Auguścik M. i in.: *Polimery* **2018**, 63, 39.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.2.6>
- [34] Lisiecki J., Błażejewicz T., Kłysz T.: *Przegląd mechaniczny* **2011**, 11, 37.

Otrzymano 18 VIII 2017 r.