



Wpływ kształtu elementu energochłonnego na zdolność pochłaniania energii

STANISŁAW OCHELSKI, PAWEŁ GOTOWICKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy opisano badania dotyczące określenia zdolności pochłaniania energii podczas uderzenia, przez elementy energochłonne wybranych kształtów. Badano wpływ kształtu elementów energochłonnych takich jak: cienkie płaskie o przekroju prostokątnym, rurki o przekroju pierścieniowym, ścięte stożki o różnych kątach wierzchołkowych, powłoki faliste i w kształcie sfer na wielkość energii absorbowanej (EA). Natomiast, na podstawie prac opublikowanych w literaturze przedstawiono wpływ kształtu słupków o przekroju ceowym i kątowym, rurek o przekroju kwadratowym, eliptycznym oraz rurek z pofalowaną ścianką na EA. Przedmiotem badań były próbki wykonane z kompozytów epoksydowych (żywica E-53) wzmocnionych włóknami szklanymi w postaci: tkaniny rowingowej marki STR-012-350-110, pasmami rowingu marki ES-10-400-0-60 i matą szklaną oraz włóknami węglowymi w postaci: tkaniny rowingowej marki TENAX HTA 5131. Badania doświadczalne prowadzono na standardowej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8802, przy prędkości obciążenia (prędkości trawersy maszyny) równej 40 mm/min. Wyniki badań przedstawiono w tabelach jako zależność siły niszczącej od odkształcenia (skrócenia próbki). Podano podstawowe właściwości próbek takie jak: wymiary geometryczne, masową zawartość włókien, masę, maksymalną i średnią siłę niszczącą, zaabsorbowaną energię oraz względną energię absorbowaną WEA, tj. energię odniesioną do masy. Zależności WEA od kształtu elementu, dla elementów wykonanych z tych samych kompozytów o jednakowej strukturze zestawiono na wykresach. Liczne fotografie próbek o różnych kształtach przed, w trakcie i po procesie niszczenia ilustrują różne mechanizmy niszczenia.

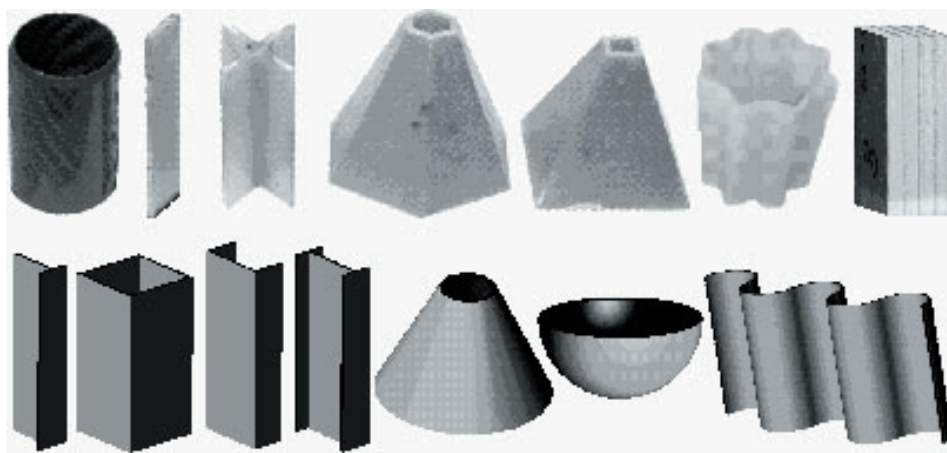
Słowa kluczowe: wytrzymałość materiałów, wytrzymałość konstrukcji, kompozyty polimerowe, absorbowanie energii, badania eksperymentalne

Symbole UKD: 539.41.

Wstęp

Na konstrukcje energochłonne mają zastosowanie elementy cienkościenne, ponieważ muszą się one niszczyć przy stosunkowo niewielkiej sile, która zmniej-

sza pik przyspieszenia podczas uderzenia. Aby jak najlepiej absorbowwały energię uderzenia, niszczenie ich powinno odbywać się w sposób progresywny, tak aby każda objętość elementu była pokruszona (połamana) na drobne cząsteczki. Sposób obciążenia elementów cienkościennych podczas niszczenia powoduje, iż są one narażone na wyboczenie i gwałtowne niszczenie. Aby temu zapobiec należy elementom cienkościennym nadać kształt, który zapewni większą sztywność poprzeczną, jak np.: rurka, ścięty stożek, płyta falista, element o przekroju krzyżowym. Poprzez wprowadzenie lekkiego tworzywa porowatego w miejsce potencjalnego wyboczenia cienkich powłok, zabezpiecza się je przed wyboczeniem (konstrukcja typu sandwich) (rys. 1).



Rys. 1. Główne kształty próbek przyjętych do badań

Kompozyty polimerowe ze względu na wysokie właściwości mechaniczne odniesione do masy, mają szerokie zastosowanie w budowie konstrukcji energochłonnych pojazdów i statków powietrznych. Wpływ na wartość pochłanianej energii mają rodzaj kompozytu jak i składniki, z których wykonany jest kompozyt lub konstrukcja przekładkowa typu sandwich. Konstrukcje energochłonne, w szczególności wykonane z kompozytów których elementy mogą przyjmować różne kształty, można projektować na żądaną wartość pochłanianej energii, a mechanizm niszczenia konstrukcji podczas zderzenia, zapewni uzyskanie wysokiej energii absorpcji.

2. Przedmiot i metoda badań

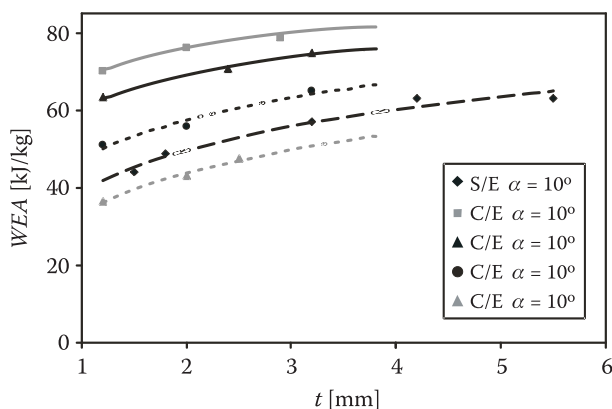
Przedmiotem badań były próbki wykonane z kompozytów epoksydowych (żywica E-53), wzmocnionych włóknami szklanymi w postaci: tkaniny rowingowej marki

STR-012-350-110, o gramaturze 350 g/m^2 , pasmami rowingu marki ES-10-400-0-60 i matą szklaną o gramaturze 316 g/m^2 oraz włóknami węglowymi w postaci: tkaniny rowingowej marki TENAX HTA 5131.

Do badań zdolności pochłaniania energii uderzenia przyjęto próbki, które miały kształt rurek o średnicy wewnętrznej $D_w = 49,3 \text{ mm}$, ściętych stożków o półkulkowym kącie wierzchołkowym równym $\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ i 20° (rys. 3), słupków o przekroju krzyżowym, prostokątnym, powłok falistych oraz sfer. Próbki w kształcie rurek, słupków oraz powłok falistych na jednej krawędzi mają wykonane ściecia pod kątem 45° , spełniające rolę inicjatora niszczenia, które powodują znaczne zmniejszenie P_{\max} i zapewniają proces progresywnego niszczenia.

Badania doświadczalne były przeprowadzone na standardowej maszynie wytrzymałościowej ISTRON 8802, w temperaturze 20°C i wilgotności 55%. Badania prowadzono przy prędkości obciążenia (prędkości trawersy maszyny) równej 40 mm/min . Zależności siły niszczącej od odkształcenia (skrócenia próbki), otrzymane podczas badań i inne wielkości mierzone, były automatycznie zapisywane w komputerze.

Do oceny wpływu kształtu elementu energochłonnego na wielkość pochłanianej energii, przyjęto jednakową grubość wszystkich elementów równą $2,5 \text{ mm}$, ponieważ zdolność pochłaniania energii w znacznym stopniu zależy od grubości, co przykładowo przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wpływ grubości ścianki stożka na zdolność pochłaniania energii wzmocnionych kompozytów epoksydowych

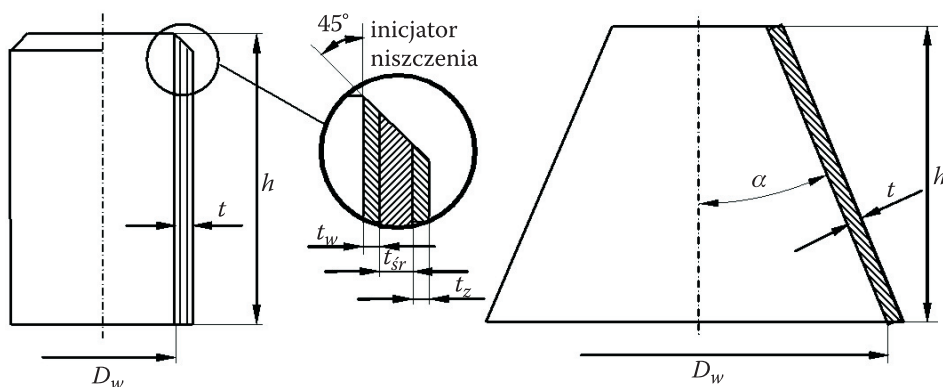
3. Badania wybranych struktur kompozytów

Badania dotyczą określenia zdolności pochłaniania energii podczas uderzenia, przez elementy energochłonne wybranych kształtów. Badaliśmy wpływ na wielkość energii absorbowanej (EA) kształtu elementów energochłonnych jak: cienkie

płaskie o przekroju prostokątnym, rurki o przekroju pierścieniowym, ścięte stożki, powłoki faliste i w kształcie sfer. Natomiast z prac opublikowanych w literaturze przedstawimy wpływ kształtu na EA słupków o przekroju ceowym i kątowym, rurek o przekroju kwadratowym, eliptycznym oraz rurek z pofalowaną ścianką.

3.1. Badania elementów o przekroju pierścieniowym

Wyniki badań rurek przedstawiono w postaci zależności $P_{nisz}-\Delta l$ i w tabeli 1.

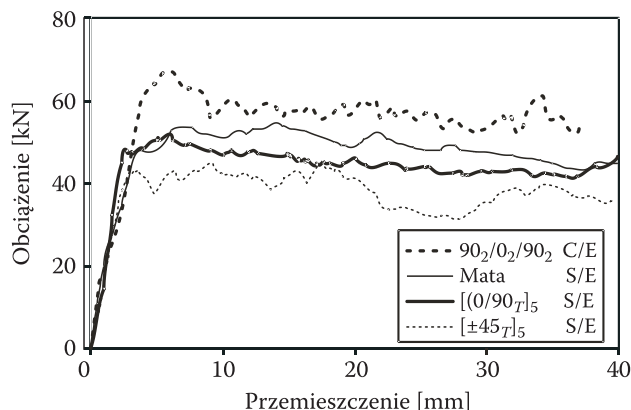


Rys. 3. Kształty próbek o przekroju pierścieniowym zastosowanych w badaniach

TABELA 1

Właściwości próbek w kształcie rurek wykonanych z różnych struktur kompozytów

Struktura	α [°]	t [mm]	D_w [mm]	h [mm]	z [%]	m [g]	P_{max} [kN]	P_{sr} [kN]	EA [J]	WEA [kJ/kg]
90 ₂ /0 ₂ /90 ₂ C/E	0	4,1	39,3	81,2	56	63,5	67	52,6	4274	67,3
Mata S/E	0	3,5	39,3	91	35	59,4	52,6	43,8	3788	63,7
[±45 _T] ₂ S/E	0	1,4	39,3	59,9	45	20	13,8	11,0	659	32,9
[(0/90) _T] ₂ S/E	0	1,4	39,3	60,1	46	19,9	15,9	13,2	791	40,1

Rys. 4. Zależności $P-\Delta l$ dla próbek w kształcie rurek wykonanych z różnych rodzajów kompozytów

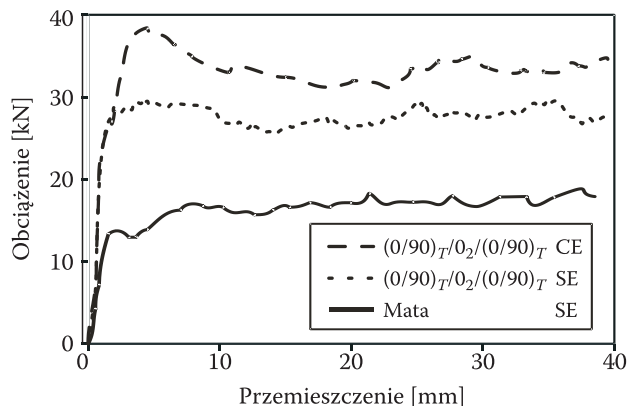
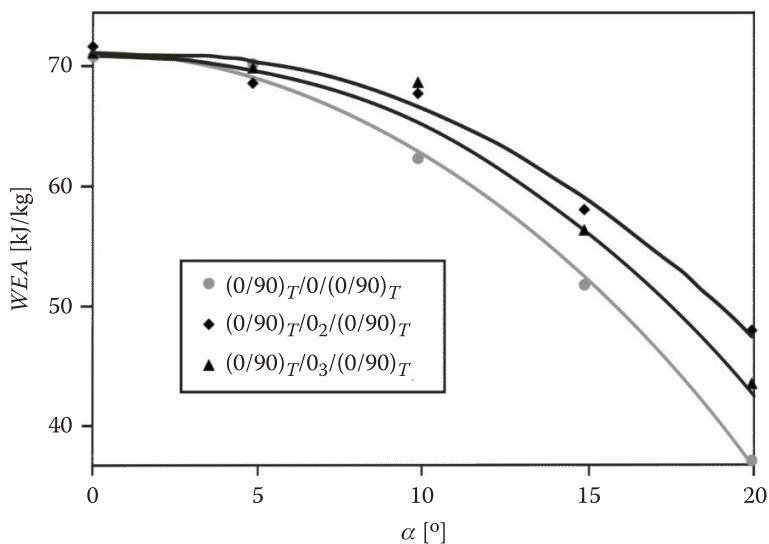
3.2. Badania elementów w postaci stożków ściętych

Podczas osiowego ściskania, próbki wykonane z kompozytów epoksydowych, wzmocnionych włóknami węglowymi lub szklanymi, niszczą się progresywnie jak materiały kruche. Do niszczenia kruchego zalicza się dwa mechanizmy: zginanie warstw (*splaying or lamina bending mode*) i ścinanie poprzeczne (*fragmentation or transverse shearing crushing mode*). W przeprowadzonych badaniach dominuje niszczenie ścianek próbek przez zginanie warstw i w małym zakresie ścinanie poprzeczne, które występuje w pierwszej fazie niszczenia. Zginaniu warstw towarzyszy powstawanie długich międzywarstwowych i równoległych do włókien pęknięć, następnie rozgięcie wiązki warstw i w końcowej fazie niszczenia — niszczące zginanie warstw połączone z ich fragmentacją. Analogiczny mechanizm niszczenia występował w badaniach ściętych stożków, za wyjątkiem stożków o grubości $t < 3$ mm i połówkowym kącie wierzchołkowym $\alpha > 15^\circ$, w których ścianki zginane są tylko do wewnątrz stożka. Na rysunku 6 przedstawiono zależność WEA od połówkowego kąta stożka.

TABELA 2

Wyniki badań stożków ściętych

Struktura	α [°]	t [mm]	D_w [mm]	h [mm]	z [%]	m [g]	P_{\max} [kN]	P_{sr} [kN]	EA [J]	WEA [kJ/kg]
$(0/90)_T/0_2/(0/90)_T$ C/E	10	2,4	59,7	83,6	42	41,3	44,8	35,1	2924	70,8
$(0/90)_T/0_2/(0/90)_T$ S/E	10	2,2	59,5	80	50	45,1	29,6	27,4	2246,8	49,8
Mata S/E	10	1,5	61	82,3	35	31,7	18,9	15,6	1279	40,4

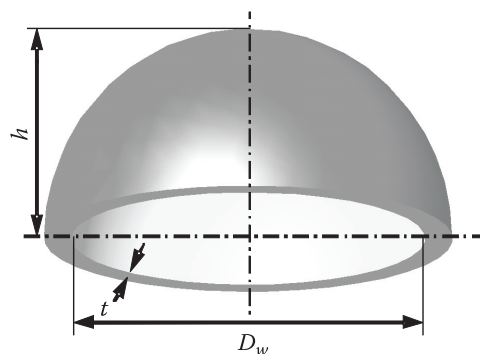
Rys. 5. Zależności $P-\Delta l$ dla próbek w kształcie stożków

Rys. 6. Wpływ połowkowego kąta stożka na WEA dla poszczególnych struktur kompozytów C/E

3.3. Badania powłok sferycznych

Na rysunku 7 zaznaczono charakterystyczne wymiary próbki w postaci sfery. W tabeli 3 i na rysunku 8 podano wyniki badań próbek w kształcie sfer.

W pierwszym etapie niszczenia elementu w kształcie powłoki sferycznej występuje niewidoczne niszczenie. Sprężysta energia absorbowana jest spowodowana pękaniem osnowy (żywicy) w wierzchołku próbki. Następnie, gdy wzrasta siła niszcząca, występuje utrata spójności pomiędzy włóknami a osnową, co po-

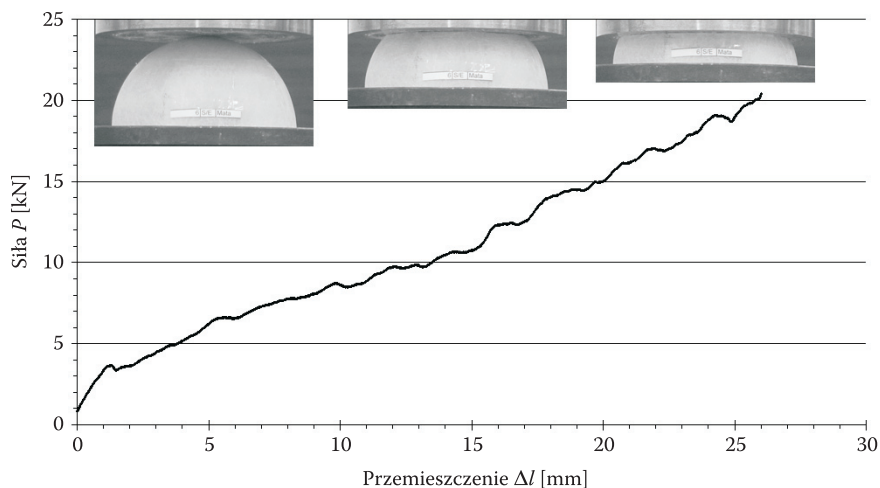


Rys. 7. Charakterystyczne wymiary elementu w kształcie sfery

TABELA 3

Wyniki badań i geometria sfery

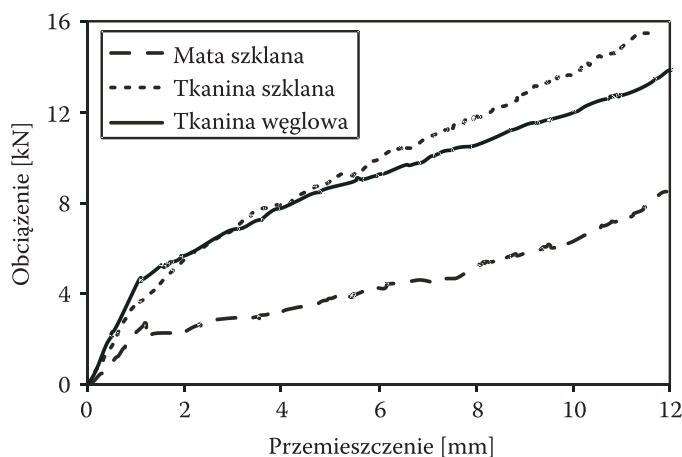
Kompozyt	Struktura	t [mm]	h [mm]	D_w [mm]	m [g]	P_{\max} [kN]	EA [kJ]	WEA [kJ/kg]
S/E	mata	3,0	27,8	50,3	17,5	9,8	0,08	11,2
S/E	$[(0/90)_T]_n$	2,8	31,4	39,5	10,8	21,9	0,17	15,7
C/E	$[(0/90)_T]_n$	2,2	26,9	39,5	7,6	19,6	0,19	24,8

Rys. 8. Wykres P - Δl sfery z kompozytu epoksydowego wzmocnionego matą szklaną

woduje powstanie mikrowybożenia. W tym stanie powierzchnia styku powłoki półkulistej z płaszczyzną podpory powiększa się, co jest pokazane na rysunku 8. Wpływ na EA mają: pęknięcia w osnowie, niszczenie adhezji pomiędzy włóknami

a osnową, mikrowyboczenie w powłoce próbki, wyboczenie powłoki, kruszenie powłoki oraz tarcie pomiędzy krawędzią próbki a powierzchnią podpory maszyny wytrzymałościowej.

Z wykresu przedstawionego na rysunku 9 wynika, że sfera wykonana z kompozytu epoksydowego wzmocnionego tkaniną szklaną o strukturze warstwy $[(0/90)_T]$ o orientacji warstw 0, 15, 30, i 45° ma średnio większą WEA o około 100% od sfery wzmocnionej matą szklaną.

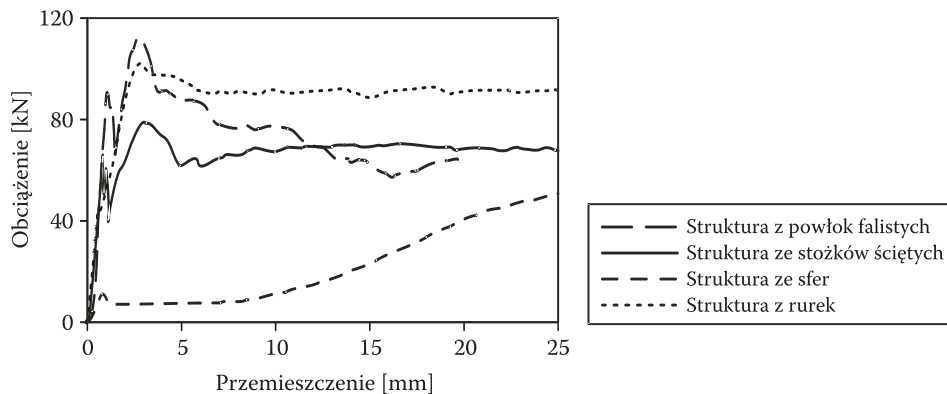


Rys. 9. Porównanie zależności $P-\Delta l$ dla sfer wykonanych z maty i tkaniny szklanej oraz tkaniny węglowej

Wybrane wyniki badań, przedstawione w tabeli 3 i na rysunkach 8-9, pokazują różniące się przebiegi $P_{nisz}-\Delta l$ od przebiegów otrzymanych z badań rurek lub stożków ściętych. Siła niszcząca podczas próby, rośnie wraz ze wzrostem przemieszczenia, co wynika z mechanizmu niszczenia sfery. Przebieg zależności $P_{nisz}-\Delta l$ elementów w postaci sfer powoduje znaczne zmniejszenie piku przyspieszenia podczas uderzenia.

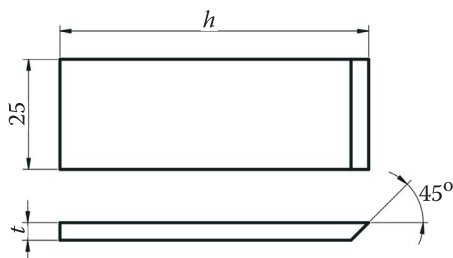
3.4. Badania energochłonne powłoki falistej

Wyniki badań powłok falistych o różnych strukturach przedstawiono w sprawozdaniu z pracy badawczej 176/WAT/2004 *Energochłonny system minimalizujący skutki awaryjnego lądowania śmigłowców* [8]. Na rysunku 10 pokazano zależności $P-\Delta l$ różnych struktur wykonanych kompozytów epoksydowych wzmocnionych matą szklaną.

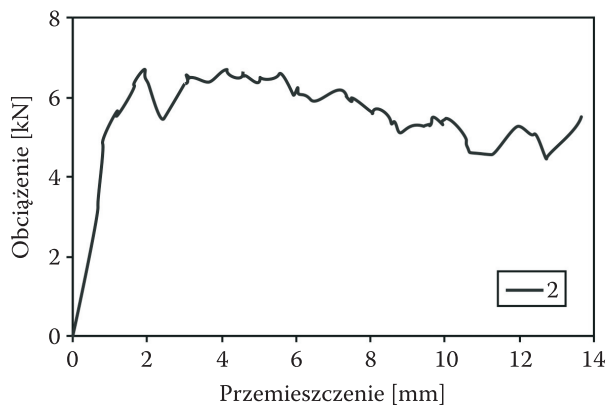
Rys. 10. Porównanie zależności $P-\Delta l$ dla różnych struktur wykonanych z maty S/E

3.5. Badania elementów płaskich o przekroju prostokątnym

Kształt i wymiary próbek oraz wyniki badań próbek płaskich o przekroju prostokątnym przedstawiono na rysunkach 11-14 i w tabeli 4.



Rys. 11. Wymiary próbek zastosowanych w badaniach

Rys. 12. Zależność $P_{nisz}-\Delta l$ dla próbki płaskiej z kompozytu C/E wzmocnionego tkaninami

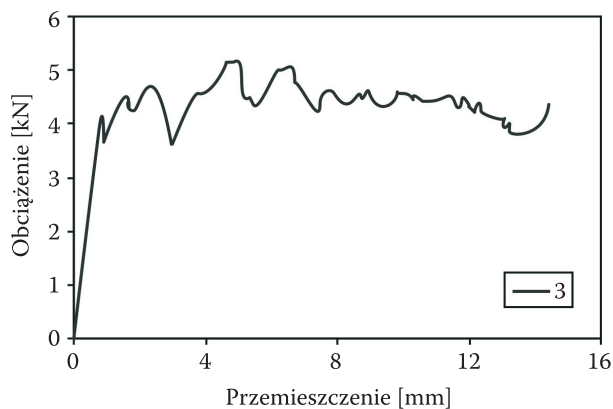
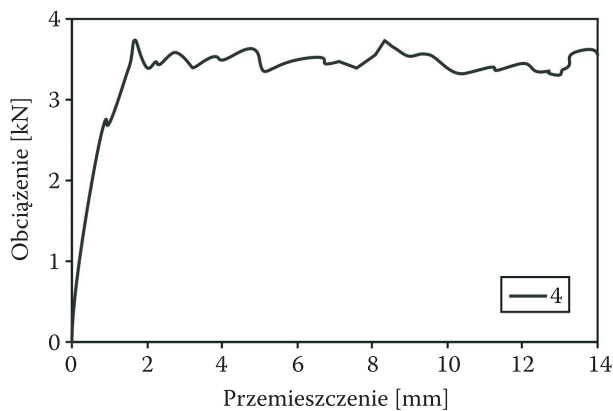
Rys. 13. Zależność $P_{\text{nisz}}-\Delta l$ dla próbki płaskiej z kompozytu S/E wzmocnionego tkaninamiRys. 14. Zależność $P_{\text{nisz}}-\Delta l$ dla próbki płaskiej z kompozytu S/E wzmocnionego matą

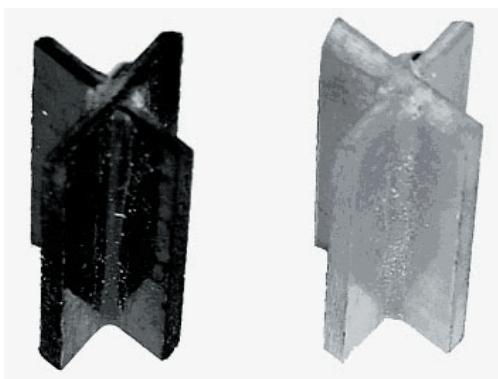
TABELA 4

Wyniki badań i geometria próbek płaskich

Nr	Komp.	Struktura	t [mm]	h [mm]	m [g]	z %	P_{max} [kN]	P_{sr} [kN]	$\frac{P_r}{P_{\text{max}}}$	EA [J]	WEA [kJ/kg]
1	C/E	[(0/90) _T] ₁₀	3	38	3,6	0,42	7,7	5,2	0,675	198	54,9
2	C/E	[(0/90) _T] ₁₀	3	38	3,6	0,42	6,8	5,4	0,794	205	57,0
3	S/E	[(0/90) _T] ₇	3	38	4,3	0,54	5,5	4,1	0,745	156	36,2
4	S/E	mata	3	38	3,9	0,33	3,9	3,1	0,795	118	30,2
5	S/E	mata	3	38	3,9	0,33	4	3,1	0,775	118	30,2

3.6. Badania próbek o przekroju krzyżowym

Na rysunku 15 pokazano zdjęcie próbek o przekroju krzyżowym, a wyniki badań przedstawiono w tabeli 5 oraz na rysunku 16.

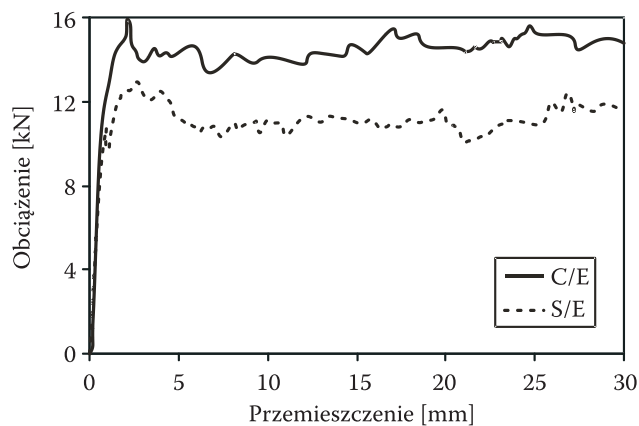


Rys. 15. Próbkki o przekroju krzyżowym z ortotropowych kompozytów S/E i C/E

TABELA 5

Wyniki badań i geometria próbek o przekroju krzyżowym

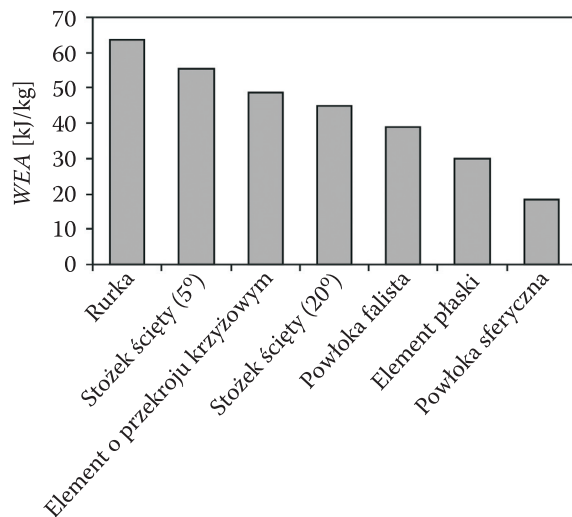
Nr	Komp.	Struktura	t [mm]	h [mm]	b [mm]	m [g]	z %	P_{\max} [kN]	P_{sr} [kN]	$\frac{P_r}{P_{\max}}$	EA [J]	WEA [kJ/kg]
1	C/E	[(0/90) _T] ₁₀	3	50	20	7,5	0,42	15,8	10,9	0,687	543	72,3
2	S/E	[(0/90) _T] ₈	3	50	20	8,8	0,54	9,2	6,99	0,758	349	39,8



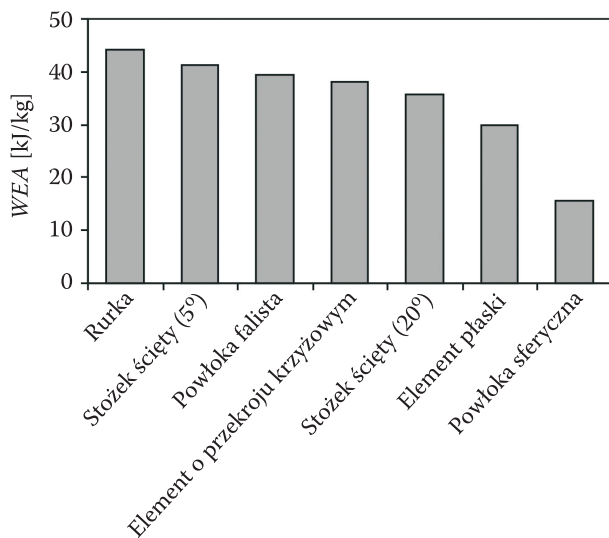
Rys. 16. Porównanie zależności $P_{\text{nisz}}-\Delta l$ dla próbek o przekroju krzyżowym wykonanych z kompozytu C/E i S/E

Na podstawie otrzymanych wyników badań wybranych struktur kompozytów, określono dane, które przedstawiono na rysunkach 17-19.

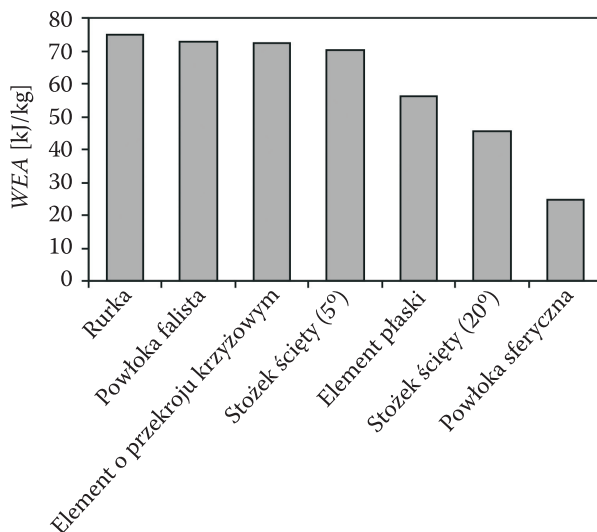
Z przedstawionych w rysunkach 17-19 danych wynika, że największą WEA wykazują elementy energochłonne w postaci rurki o przekroju pierścieniowym, następnie stożki ścięte, powłoki pofalowane, powłoki płaskie, a najmniejszą WEA



Rys. 17. Zależność WEA od kształtu elementu epoksydowego wzmocnionego matą szklaną

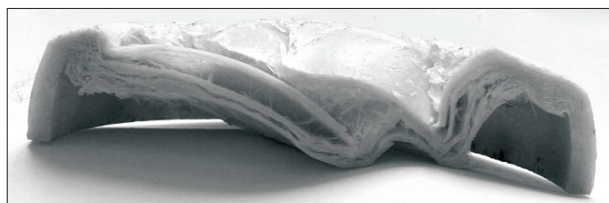


Rys. 18. Zależność WEA od kształtu elementu epoksydowego wzmocnionego tkaniną szklaną



Rys. 19. Zależność WEA od kształtu elementu epoksydowego wzmocnionego tkaniną węglową

— sfery. Najmniejsza WEA elementu w postaci sfery jest spowodowana specyficznym mechanizmem niszczenia. Podczas niszczenia nie występuje krucha fragmentacja ścianki elementu i pękanie włókien, lecz ścianka czaszy jest zginana do wewnątrz czaszy z trwałą deformacją — patrz rysunek 20.

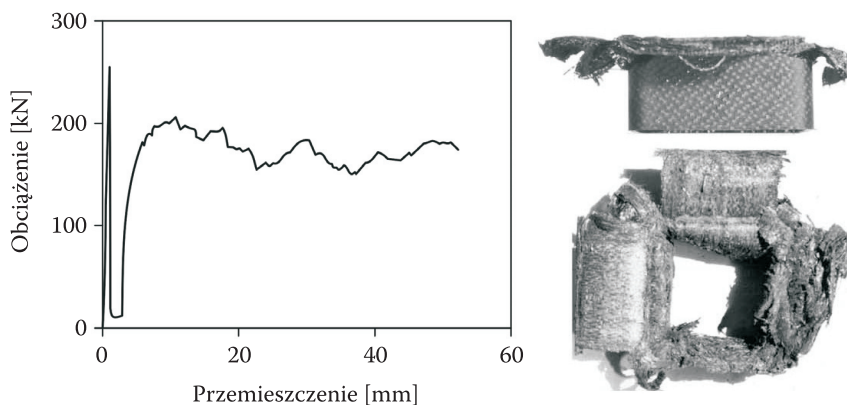


Rys. 20. Przekrój zniszczonej próbki sferycznej przez zginanie ścianki do wewnątrz czaszy

3.7. Badania zdolności pochłaniania energii przez słupki o przekroju prostokątnym

Elementy energochłonne w kształcie rurek o przekroju kwadratowym i prostokątnym są mniej efektywne w pochłanianiu energii od rurek o przekroju kołowym. Kinderwater w pracy [5] stwierdza, że przekroje kwadratowe i prostokątne rurek mają odpowiednio 0,8 i 0,5 WEA w porównaniu do WEA rurek o przekroju pierścieniowym. Głównym powodem tego zjawiska jest koncentracja naprężeń

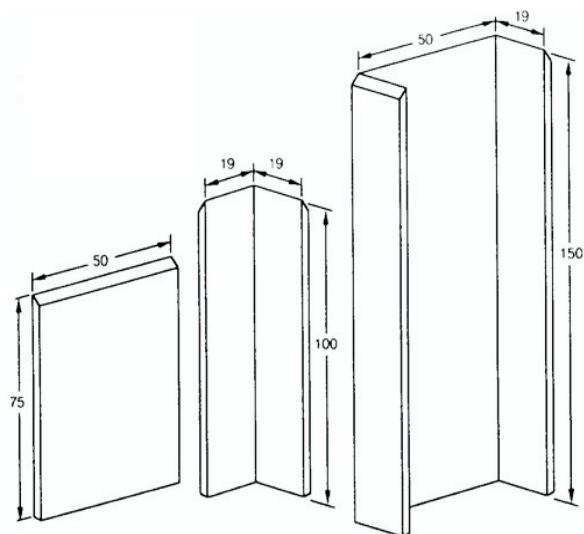
w narożnikach próbki, powodująca duże pęknięcia. Te pęknięcia dominują w mechanizmie niszczenia, powodując obniżenie WEA.



Rys. 21. Zależność $P_{nisz}-\Delta l$ i zdjęcie zniszczonej rurki o przekroju kwadratowym wykonanej z kompozytu C/E [6]

3.8. Badania zdolności pochłaniania energii przez słupki o przekroju ceowym i kątowym

Badania zdolności pochłaniania energii elementów w postaci płaskownika, kątownika i ceownika przedstawiono w pracy [3] (Bolukbasi i Laananen). Prób-

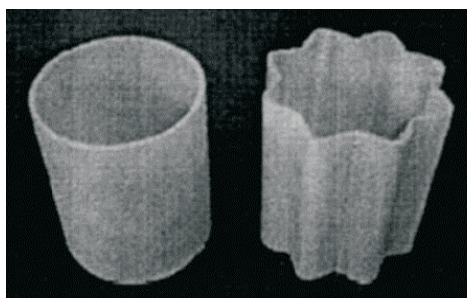


Rys. 22. Kształty i wymiary próbek w postaci płyty, ceownika i kątownika [3]

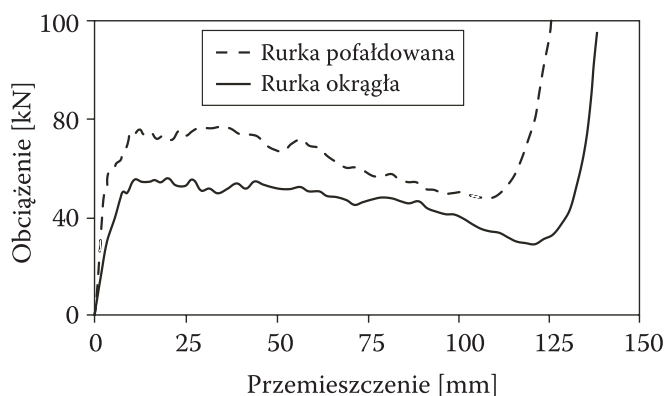
ki wykonane były z kompozytu grafit/epoksyd o różnych strukturach: $[\pm 45]_{10}$, $[\pm 45_2/0/\pm 45_2]_s$ i $[\pm 45/0_2/\pm 45]_s$. Wszystkie próbki niszczyły się przez zginanie warstw i wykazywały dużą zdolność *EA*. W badaniach zarejestrowano wartości *WEA*: 65-98 kJ/kg dla próbek w postaci płyt, 32-67 kJ/kg dla próbek o przekroju kątowym i 40-84 kJ/kg dla próbki o przekroju ceowym. Mniejsza wartość *WEA* kształtowników od płyt jest spowodowana dużą koncentracją naprężeń w narożach kształtowników, które przyspieszały początek niszczenia.

3.9. Badania wpływu pofałdowania ścianki rurki na wielkość *EA*

W pracy [1] opisane zostały wyniki badań wpływu pofałdowania ścianki rurki na wielkość *EA*. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 24, z którego wynika wzrost *EA* rurki pofalowanej w stosunku do rurki gładkiej, spowodowany zwiększoną sztywnością ścianki, oraz spadek *WEA* spowodowany znacznym zwiększeniem masy próbki.



Rys. 23. Zdjęcie badanych próbek [1]

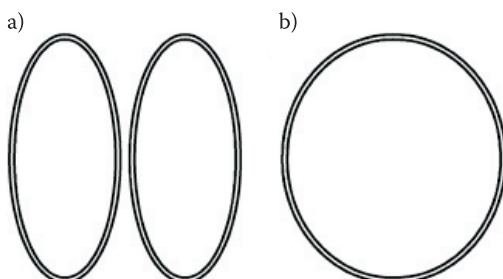


Rys. 24. Zależność *P-Δl* próbek o przekroju pierścieniowym i pofałdowanym [1]

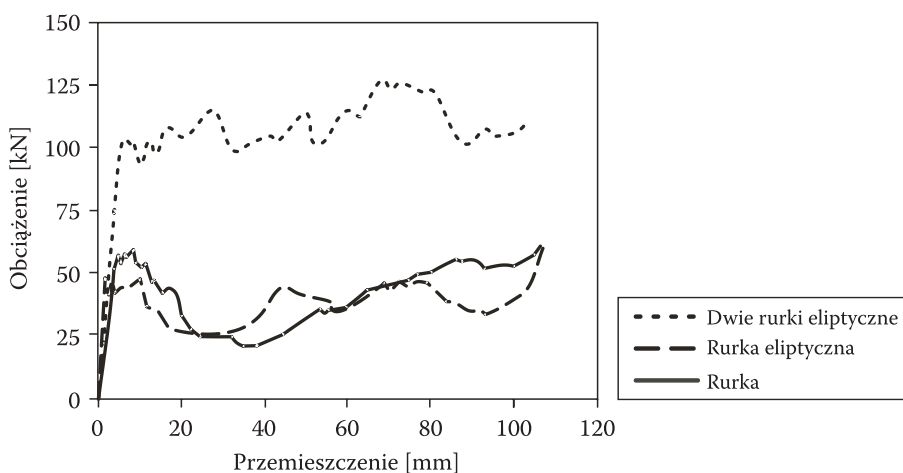
3.10. Wpływ przekroju eliptycznego rurek na wartość WEA

Badania wpływu przekroju eliptycznego rurek na wartość WEA opisano w pracy [2]. Badane były rurki wykonane z kompozytu epoksydowego wzmocnionego szklanymi tkaninami rowingowymi, o orientacji włókien $[0/90]_T$ oraz rurki z żywicy epoksydowej, włókien naturalnych i tworzyw porowatych. Wszystkie próbki miały długość równą 150 mm i większą średnicę elipsy 159,4 mm. Stosunek średnic elips wynosił: 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0. Badaniom doświadczalnym poddano zestaw pojedynczych rurek eliptycznych, wypełnionych lekkim wypełniaczem, który znacznie zwiększa sztywność zginania przy niewielkim wzroście masy oraz zestaw dwóch rurek o przekroju eliptycznym i stosunku średnic równym 2, które przedstawiono na rysunku 25.

Na rysunku 26 przedstawiono porównanie zależności $P-\Delta l$ dla rurek eliptycznych o stosunku średnic 1,0 i 2,0, przy czym wszystkie rurki wypełnione były lekkim tworzywem porowatym.



Rys. 25. Zestaw dwóch rurek o przekrojach eliptycznych a); przekrój pierścieniowy rurki b)

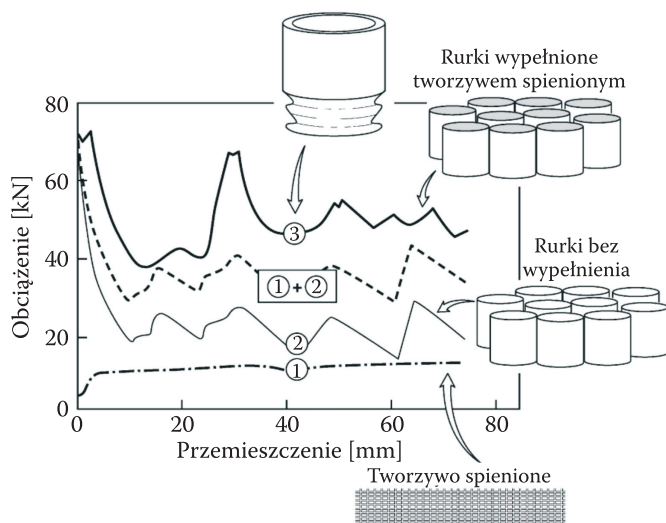


Rys. 26. Porównanie zależności siły niszczącej od przemieszczenia dla pojedynczych i podwójnej próbki złożonej z dwóch próbek eliptycznych, wypełnionych lekkim tworzywem porowatym [2]

Znacznie większą zdolność pochłaniania energii wykazuje próbka składająca się z dwóch eliptycznych rurek, wypełnionych lekkim tworzywem porowatym, w porównaniu z wypełnioną rurką o przekroju pierścieniowym. Jednakże masa dwóch eliptycznych rurek jest znacznie większa i powoduje, że ich *WEA* jest mniejsza od rurki o przekroju pierścieniowym.

3.11. Korzystny efekt wypełnienia rurek tworzywem spienionym

Korzystny efekt jest spowodowany tendencją do niszczenia stabilnego, wywołanego brakiem lokalnego wyoboczenia cienkich ścianek rurek. Zagadnienie to badali Brachos i Douglas, które przedstawili w pracy [7] (rys. 27). Z tego rysunku wynika, że suma zdolności pochłaniania energii wypełniacza piankowego i niewypełnionych rurek jest mniejsza niż rurek wypełnionych tym samym wypełniaczem.



Rys. 27. Zależność $P-\Delta l$ dla próbki z wypełnieniem i bez wypełnienia [7]

4. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wyników badań zdolności pochłaniania energii przez elementy o różnych kształtach można sformułować następujące uogólnienia:

1. Największą *WEA* wykazują elementy o przekroju pierścieniowym, nieco mniejszą stożki ścięte, a następnie elementy płaskie w kształcie cienkiego prostopadłościanu i przekroju falistym oraz najmniejszą z przebadanych, elementy w kształcie sfery. Zmniejszona *WEA* elementów w kształcie stożków ściętych w stosunku do rurek jest spowodowana tym, że tylko składowa siły ściskającej

działa wzdłuż ścianki elementu. WEA stożków maleje wraz ze wzrostem kąta połówkowego stożka. Elementy o kształcie cienkich prostopadłościanów wykazują dużą WEA pod warunkiem, że stosunek długości elementu do grubości zapewnia progresywne niszczenie (brak wyboczenia).

2. Wyniki badań elementów energochłonnych różnych kształtów stwarzają możliwość ich prawidłowego doboru do projektowanej konstrukcji energochłonnej, narażonej na obciążenie udarowe.
3. Elementy w postaci czaszy niszczą się przy małej sile w pierwszej fazie niszczenia, przez zginanie całej grubości ścianki do wewnątrz czaszy. W dalszych fazach niszcząca siła stopniowo rośnie, ponieważ niszczone przekroje są coraz większe. Przebieg zależności $P-\Delta l$ elementów w kształcie sfer, w której w czasie procesu niszczenia rośnie siła niszcząca, powoduje powstanie mniejszych pików przyspieszenia, a za tym i mniejszych przeciążeń, w porównaniu z elementami w postaci rurek.

Artykuł wpłynął do redakcji 5.02.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2008 r.

LITERATURA

- [1] F. ELFETORI, S. SULAIMAN, A. HAMOUDA, E. MAHDI, *Effect of geometry on the crushing behaviour of laminated corrugated composite tubes*, J. of Materials Processing Technology.
- [2] E. MAHDI, A. HAMOUDA, A. MOKHTAR, D. MAJID, *Many aspects to improve damage tolerance of collapsible composite energy absorber devices*, Composite Structures, 2005, 175-187.
- [3] A. BOLUKBASI, D. LAANANEN, *Analytical and Experimental Studies of Crushing Behaviour in Composite Laminates*, Journal of Composite Materials, vol. 29, no. 8, 1995, 1117-1139.
- [4] G. FARLEY, R. JONES, *Energy-Absorption Capability of Composite Tubes and Beams*, NASA TM 101634, 1989.
- [5] C. KINDERVATER, *Energy Absorption of Composites as an Aspect of Aircraft Structural Crash-Resistance*, Developments in the Science and Technology of Composite Materials, Ed.s FULLER, J. et al., Elsevier Applied Science Publishers, London, 1990, 643-651.
- [6] A. MAMALIS, D. MANOLAKOS, M. IOANNIDIS, D. PAPAPOSTOULOU, *Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tubes: experimental*, Composite Structures, 2004, 347-360.
- [7] V. BRACHOS, C. DOUGLAS, *Energy Absorption Characteristics of Hybrid Composite Structures*, Proceedings of the 27th International SAMPE Technical Conference, 1995, 421-435.
- [8] Sprawozdanie z pracy badawczej 176/WAT/2004 *Energochłonny system minimalizujący skutki awaryjnego lądowania śmigłowców*.

S. OCHELSKI, P. GOTOWICKI

Influence of a shape of energy-absorbing element on energy absorption capacity

Abstract. Research on determining an energy absorption capacity of energy-absorbing elements of selected shapes during the impact is described in this paper. The influence of a shape of energy-absorbing elements of such shapes as thin plates of rectangular cross-section, cylindrical tubes, conical

tubes with different apex angles, wavy plates, and semi-spheres on a value of the absorbed energy was examined. Additionally, on the basis of on the information available in literature, influence of other elements such as U-channel and angle bars, square and elliptical tubes, and wavy-walled tubes was described. The specimens made from epoxy composites (E-53 resin) were tested. A structure of the composites was reinforced with glass fibers in the form of STR-012-350-110 rowing fabric, ES-10-400-0-60 rowing wisps and glass mat, as well as carbon fibers in the form of TENAX HTA 5131 rowing fabric. Experimental tests were conducted on universal testing machine INSTRON 8802 at a constant crosshead displacement rate of 40 mm per minute. The test results were presented as compressive force vs. displacement (specimen shortening). The basic properties of the specimens, including their geometrical dimensions, mass fiber contents, weights, maximum and average values of compression force, absorbed energy, and relative absorbing energy related to specimen weight, were provided in tables. The relations between relative absorbing energy and composite structures for the specimens made from composites of the same structure were compared in the form of graphs. Numerous photographs, taken during the compression test, as well as before and after it, indicate different failure mechanisms for each of the specimens.

Keywords: strength of material, structural strength, polymer composites, energy absorbing, experimental tests

Universal Decimal Classification: 539.4

