



Wpływ struktury kompozytu polimerowego na zdolność pochłaniania energii uderzenia

STANISŁAW OCHELSKI

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

Streszczenie. W pracy opisano doświadczalne badania zdolności pochłaniania energii przez kompozyty polimerowe o różnych strukturach, wzmocnionych włóknami węglowymi i szklanym. Przeanalizowano wpływ na wartość pochłaniania energii takich czynników, jak: rodzaj włókien wzmacniających, rodzaj struktury, geometria i kształty próbek, orientacja włókien w warstwie i sekwencja układania warstw. Zbadano też wpływ grubości warstw w kompozycie o różnej strukturze na zdolność pochłaniania energii.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, energia absorpcji, badania doświadczalne

Symbole UKD: 678.7.01

1. Wstęp

Poszczególne elementy konstrukcji energochłonnej powinny być wykonane z elementów cienkościennych, ponieważ muszą się one niszczyć przy stosunkowo niewielkiej sile, aby nie narażać konstrukcji na duże przeciążenia. Ale elementy cienkościenne są narażone na wyboczenie i gwałtowne niszczenie. Aby zabezpieczyć cienkie płyty (ściskane w płaszczyźnie płyty) przed wyboczeniem, wprowadza się pomiędzy nie lekkie tworzywa porowate lub nadaje się im odpowiedni kształt — rurka, płyta falista, element o przekroju krzyżowym.

W pracach [1-4] przedstawiono badania wpływu rodzaju materiału i struktury na zdolność pochłaniania energii próbek o przekroju okrągłym, kwadratowym i prostokątnym. Badano także wpływ na EA (Energia Absorbowana) takich czynników jak geometria próbki i orientacja warstw. Wyniki badań wpływu orientacji warstw oraz geometrii próbki w kompozytach węgiel/epoksyd i aramid/epoksyd

na wartość EA, przedstawiono w pracach [5, 6]. Próbkki wzmocnione włóknami aramidowymi wykazały wzrost WEA (Energia Absorbowana podzielona przez masę zniszczonej części próbki) dla kątów orientacji włókien z przedziału $\theta = 15^\circ \sim 45^\circ$, natomiast spadek WEA następował dla kątów z przedziału $\theta = 45^\circ \sim 75^\circ$. Wyniki badań potwierdziły, że struktury wzmocnione włóknami węglowymi absorbują więcej energii, kiedy orientacja włókien jest zgodna z kierunkiem obciążenia. Jednakże w pracy [7] wykazano, że kompozyt składający się tylko z warstw $[0^\circ]$ nie posiada dużych zdolności pochłaniania energii, ponieważ brak warstwy o strukturze zbliżonej do $[90^\circ]$ sprzyja szybkiemu wzrostowi pęknięć wzdłużnych, które powodują niszczenie elementu przy mniejszej sile. Zjawisko to zostało potwierdzone doświadczalnie, podczas osiowego ściskania rurki z włóknami ułożonymi równoległe do osi, z zewnętrznym pierścieniem przesuwym, przy którym niszczenie odbywało się przy większej sile, ponieważ pierścień powoduje ograniczenie rozwoju pęknięć wzdłużnych i prowadzi do mechanizmu niszczenia metodą zginania.

2. Przedmiot i metoda badań

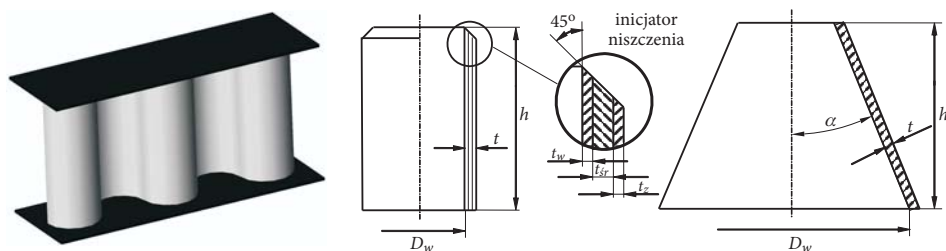
Przedmiotem badań były próbki wykonane z kompozytów epoksydowych (E-53) wzmocnionych włóknami szklanymi w postaci tkaniny rowingowej marki STR-012-350-110, o gramaturze 350 g/m^2 , pasm rovingu marki ES-10-400-0-60 i maty szklanej o gramaturze 316 g/m^2 oraz włóknami węglowymi w postaci tkaniny rowingowej marki TENAX HTA 5131 i pasm węglowego rovingu marki TENAX HTS 5631.

Do badań zdolności pochłaniania energii uderzenia przyjęto próbki w postaci rurek, o średnicy wewnętrznej $D_w = 49,3 \text{ mm}$, oraz ściętych stożków o połówkowym kącie wierzchołkowym równym $\alpha = 5, 10, 15$ i 20° , i o grubości ścianki z zakresu $t = 1,2 \div 9 \text{ mm}$ (rys. 1) oraz w kształcie cienkich prostopadłościanów. Próbki w kształcie rurek, powłoki falistej i cienkiego prostopadłościanu na jednej krawędzi mają wykonane ścięcia pod kątem 45° , spełniające rolę inicjatora niszczenia, powodują one znaczne zmniejszenie P_{\max} i zapewniają proces progresywnego niszczenia. Próbki w postaci ściętych stożków nie wymagają wykonania inicjatora, ponieważ początek niszczenia rozpoczyna się od mniejszej średnicy stożka, w której podczas ściskania występują największe naprężenia.

Przyjęto do badań kompozyty o osnowach: epoksydowej, winyloestrowej, polieteroeteroetonowej, wzmocnione włóknami węglowymi i szklanymi, o następujących strukturach próbek: $[0_n]$; $[90_n]$; $[(0/90)_T]_n$; $[90/0_n/90]$; $[\pm 15/0_n/\pm 15]$; $[\pm 30/0_n/\pm 30]$; $[(\pm 45)_T/0_n/(\pm 45)_T]$; $[(0/90)_T/0_n/(0/90)_T]$; $[(\pm 45)_T/(0/90)_T/(\pm 45)_T]$, gdzie warstwa $[0^\circ]$ oznacza kompozyt z ułożonymi równoległe do osi próbek włóknami ciągłymi; $[90^\circ]$ — włókna ułożone prostopadle do osi próbki; $[(0/90)_T]$ — warstwa wzmocniona tkaniną. Środkowe warstwy ścianki próbki miały zazwyczaj włókna ułożone

równoległe do osi próbki. Badano też próbki z kompozytów epoksydowych wzmocnionych matą szklaną.

Badania doświadczalne były przeprowadzane na standardowej maszynie wytrzymałościowej ISTRON 8802, w temperaturze 20°C i wilgotności 55%. Badania wykonywano przy prędkości obciążenia (prędkości tawersy maszyny) równej 40 mm/min. Liczne prace wykazują, że WEA nieznacznie zależy od prędkości obciążenia. Zależności siły niszczącej od odkształcenia (skrócenia próbki) otrzymane podczas badań były zapisywane automatycznie w komputerze. Ponadto podane są charakterystyczne wymiary próbek, przedstawionych na rysunku 1.



Rys. 1. Kształty próbek zastosowanych w badaniach

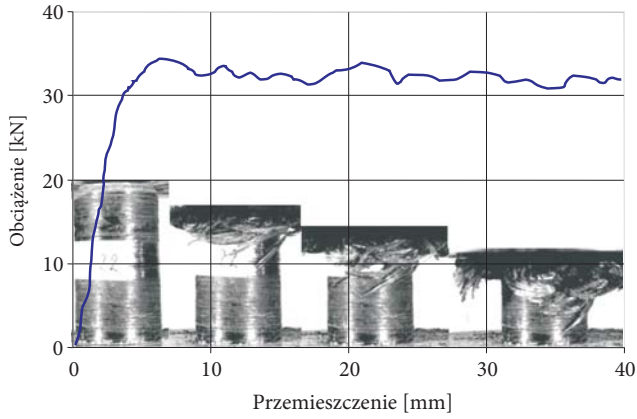
Energia absorpcji (EA) została obliczona poprzez numeryczne całkowanie pola pod wykresem siła (P) — przemieszczenie (Δl). Krok całkowania (długość przedziału Δl) był stały i wynikał z częstotliwości próbkowania wyników. Ilość przedziałów n wynosiła dla każdego wykresu 2251.

3. Wyniki badań doświadczalnych

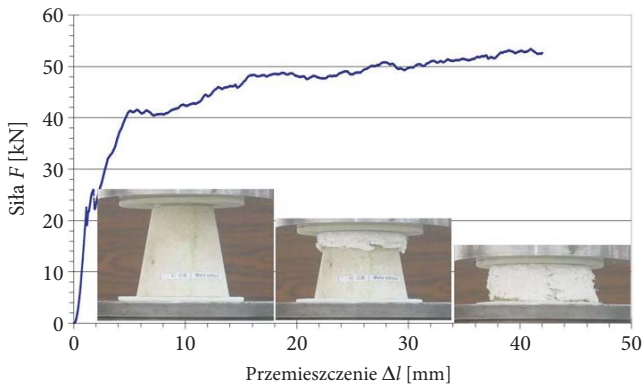
Wyniki badań właściwości mechanicznych kompozytów epoksydowych i winyloestrowych wzmocnionych włóknami węglowymi i szklanymi przedstawiono w [9], do rozważań wykorzystano wyniki dodatkowych badań kompozytów o nowych strukturach.

Zależności siły niszczącej od przemieszczenia, określone w próbach doświadczalnych próbek wykonanych z kompozytów epoksydowych wzmocnionych włóknami węglowymi i szklanymi przykładowo przedstawiono na rysunkach 2-4. Wyniki badań przedstawione w tabelach 1 i 2 są zestawione w zależności od struktury i rodzaju kompozytu.

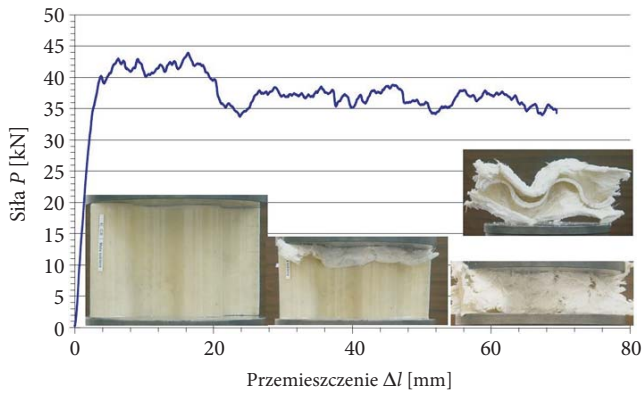
Fotografie otrzymane podczas badania kompozytów wzmocnionych włóknami węglowymi i szklanymi w trakcie progresywnego niszczenia próbek przykładowo przedstawiono na rysunkach 2-4.



Rys. 2. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia kompozytu węgiel/epoksyd w kształcie rurki



Rys. 3. Postępujące niszczenie próbki w kształcie stożka ściętego wykonanej z kompozytu szkło/epoksyd



Rys. 4. Zależność P - Δl dla próbki w postaci powłoki falistej wykonanej z kompozytu szkło/epoksyd

3.1. Wpływ struktury kompozytów różnych rodzajów osnów i wzmocnień na WEA

Do rozważań przyjęto osnowy i włókna najczęściej stosowane do budowy kompozytowych konstrukcji energochłonnych statków latających i samochodów. Badaniu poddano kompozyty epoksydowe, winyloestrowe i polieteroeteroketonowe, które miały wzmocnienia węglowe, szklane i aramidowe różnej postaci (włókien ciągłych, tkanin i mat) [8]. Wyniki badań wpływu osnowy kompozytu na wielkość WEA przedstawiono w tabeli 1. Natomiast w tabeli 2 zestawiono wyniki badań WEA struktur wybranych wzmocnień kompozytów epoksydowych [11].

Na podstawie wyników badań przedstawionych w tabeli 1 wnioskujemy, że największą WEA wykazują kompozyty z osnową polietereterketonu (PEEK), nieznacznie mniejszą z osnową winyloestrową, a znacznie mniejszą od winyloestrowej wykazują kompozyty z osnową epoksydową.

TABELA 1

Zestawienie WEA w różnych rodzajach osnów wybranych struktur (S — włókna szklane, C — włókna węglowe, A — włókna aramidowe)

Kształt próbek	Struktura	Kompozyt Epoksydowy WEA [kJ]	Kompozyt Winyloestrowy WEA [kJ]	Kompozyt z żywicy PEEK WEA [kJ]
Cienki prostopadłościan	Mata Szklana (S)	40,8	35,3	58,5
	[(0/90) _T] ₈ (S)	41,3	69,8	71,2
	[(±45) _T] (S)	47,8	62,1	76,4
	[0] ₉ (S)	38,8	42,8	69,3
	[0/90 _T /(±45) _T /0] _S (S)	36,8	51,7	62,1
	[(0/90) ₈ (C)	67,7	70,3	92,5
	[(±45) _T] (C)	65,1	68,9	89,3
	[0] ₉ (C)	62,4	64,9	86,9
	[0/90 _T /(±45) _T /0] _S (C)	60,8	62,9	81,8
	[(0/90) ₈ (A)	48,1	59,2	62,8
	[(±45) _T] (A)	47,9	60,7	65,2
[0/90 _T /(±45) _T /0] _S (A)	47,4	58,3	63,4	

cd. tabeli 1

Rurki		$[0_3]_S$ (S)	41,9	42,8	76,2
		$[\pm 15/0_2]_S$ (S)	47,5	49,3	80,3
		$[\pm 30/0_2]_S$ (S)	32,6	36,6	79,8
		$[\pm 45/0_2]_S$ (S)	53,4	57,9	86,4
		$[90/0_2]_S$ (S)	48,6	68,9	82,5
		$[(0/90)_T/0_2]_S$ (S)	64,2	72,9	87,1
		$[\pm 15/0_2]_S$ (C)	71,3	73,3	94,9
		$[\pm 30/0_2]_S$ (C)	62,1	64,7	84,8
		$[90/0_2]_S$ (C)	75,1	76,1	96,1
		$[(0/90)_T/0_2]_S$ (C)	77,2	80,2	98,2
Stożek ścięty $\varphi =$	5°	$(0/90)_T/0/(0/90)_T$ (S)	61,1	63,1	–
	10°		59,6	62,5	–
	15°		48,9	52,7	–
	20°		35,8	38,9	–
	5°	$[(0/90)_T]_2/0_2/[(0/90)_T]_2$ (S)	70,2	74,2	–
	10°		69,8	71,3	–
	15°		67,8	69,9	–
	20°		61,6	64,2	–
	5°	$(0/90)_T/0/(0/90)_T$ (C)	69,9	72,3	–
	10°		67,3	70,6	–
	15°		55,8	60,2	–
	20°		43,1	52,9	–
	5°	$[(0/90)_T]_2/0_2/[(0/90)_T]_2$ (C)	77,3	80,2	–
	10°		76,8	78,5	–
	15°		75,4	75,9	–
	20°		68,9	71,8	–

TABELA 2

Zestawienie WEA różnych rodzajów wzmocnień kompozytów epoksydowych dla wybranych struktur

Kształt próbki	Struktura	Węglowy rowing	Węglowe tkaniny	Szklany rowing	Szklane tkaniny	Aramidowe tkaniny	
Płaskie	$[0]_8$	62,4	–	40,2	–	–	
	$[(\pm 45)_T]$	–	65,1	–	47,8	47,9	
	$[(0/90)_T]_{10}$	–	67,7	–	41,3	48,1	
	$[0/90_T/(\pm 45)_T/0]_S$	–	60,8	–	36,8	47,4	
Rurki	$[0]_8$	62,4	–	41,9	–	–	
	$[\pm 15/0_2]_S$	71,3	–	47,5	–	–	
	$[\pm 30/0_2]_S$	62,1	–	32,6	–	–	
	$[\pm 45/0_2]_S$	56,8	–	53,4	–	–	
	$[90/0_2]_S$	75,1	–	48,6	–	–	
	$[(0/90)_T/0_2]_S$	–	87,4	–	64,2	57,5	
Stożek ścięty $\varphi =$	$(0/90)_T/0/(0/90)_T$	5°	–	73,4	–	70,2	–
		10°	–	76,8	–	69,8	–
		15°	–	75,4	–	67,8	–
		20°	–	68,9	–	61,6	–
	$[(0/90)_T]_2/0_2/[(0/90)_T]_2$	5°	–	69,9	–	61,1	–
		10°	–	67,3	–	59,6	–
		15°	–	55,8	–	48,9	–
		20°	–	43,1	–	35,8	–

Na podstawie wyników badań przedstawionych w tabeli 1 i na rysunku 7 wnioskujemy, że największą WEA wykazują kompozyty z osnową polietereeterketonu (PEEK), nieznacznie mniejszą z osnową winyloestrową, a znacznie mniejszą od winyloestrowej wykazują kompozyty z osnową epoksydową.

Właściwości mechaniczne osnowy kompozytu mają duży wpływ na odporność na pękanie. Badania wykazały, że im osnowa kompozytu jest bardziej krucha (mała wiązkość), tym odporność na pękanie jest mniejsza, a za tym niszczy się przy mniejszej sile i mniejsza jest EA. Najbardziej odporny na pękanie spośród analizowanych kompozytów jest kompozyt z osnową termoplastyczną PEEK, wzmocniony włóknami węglowymi [10].

Z wyników przedstawionych w tabeli 2 i na rysunku 8 wnioskujemy, że kompozyty wzmocnione włóknami węglowymi wykazują największą zdolność pochłaniania energii uderzenia, natomiast kompozyty wzmocnione włóknami aramidowymi najmniejszą. Zjawisko to można wytłumaczyć właściwościami mechanicznymi włókien. Włókna węglowe mają wysoką wytrzymałość na ściskanie i ścinanie, a podczas niszczenia kompozyty podlegają ścinaniu i zginaniu warstw. Natomiast włókna aramidowe mają bardzo niską wytrzymałość na ściskanie (R^-), lecz bardzo dużą wytrzymałość na rozciąganie ($R^+ = 1300$ MPa).

Zachowanie się kompozytu epoksydowego wzmocnionego włóknami aramidowymi w próbie osiowego ściskania zdominowała krucha osnowa i plastyczne włókna, charakteryzowało się ono szybkim rozwojem delaminacji. Właściwości mechaniczne, a w szczególności sztywność zginania warstwy z włóknami aramidowymi, są niższe niż warstw wzmocnionych włóknami węglowymi i szklanymi — EA w przypadku kompozytu aramidowego była niższa.

3.2. Wpływ struktury i grubości warstw w kompozycie na WEA

Do określenia zależności wpływu grubości warstw w kompozycie na wartość WEA wykorzystano wyniki badań przedstawione w tabelach 1a i 1b w pracy [9]. Zależności WEA od stosunku grubości warstwy środkowej do grubości warstwy zewnętrznej ścianki kompozytu (t_{sr}/t_z), dla rurek wykonanych z kompozytu węgiel/epoksyd i szkło/epoksyd, przedstawiono na rysunku 9. Z zależności tej wynika, że dla kompozytu szkło/epoksyd wartość maksymalna WEA występuje przy $t_{sr}/t_z > 3,0$. Natomiast w przypadku kompozytu węgiel/epoksyd WEA nieznacznie zależy od grubości warstw (t_{sr}/t_z).

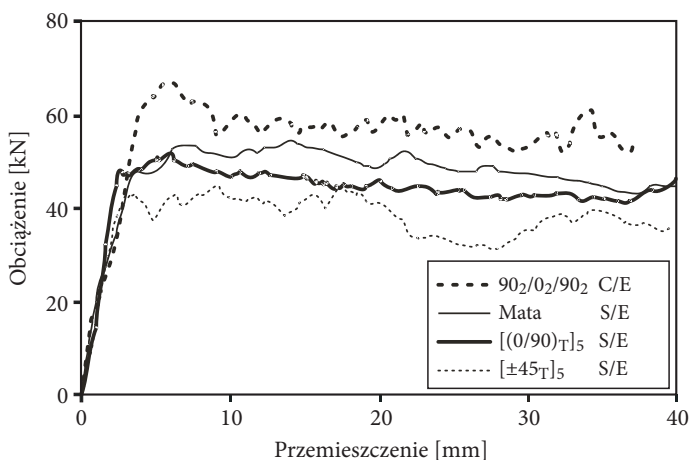
Otrzymane różne zależności dla kompozytów szkło/epoksyd i węgiel/epoksyd wynikają z większej adhezji włókien węglowych do żywicy epoksydowej aniżeli włókien szklanych. Ponadto, wytrzymałość na ścinanie w płaszczyznach równoległych do włókien kompozytów o strukturze $[0^0]_n$, dla kompozytu węgiel/epoksyd wynosi 20,6 MPa, a dla kompozytu szkło/epoksyd tylko 8,8 MPa, czyli dla kompozytów węgiel/epoksyd jest ona 2,3 razy większe. Dla stosunku $t_{sr}/t_z = \infty$, czyli kompozytu węgiel/epoksyd o strukturze $[0^0]_n$, WEA wynosi 76,2 kJ, które jest w przybliżeniu równe średniej WEA dla $t_{sr}/t_z = (1-5)$.

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.

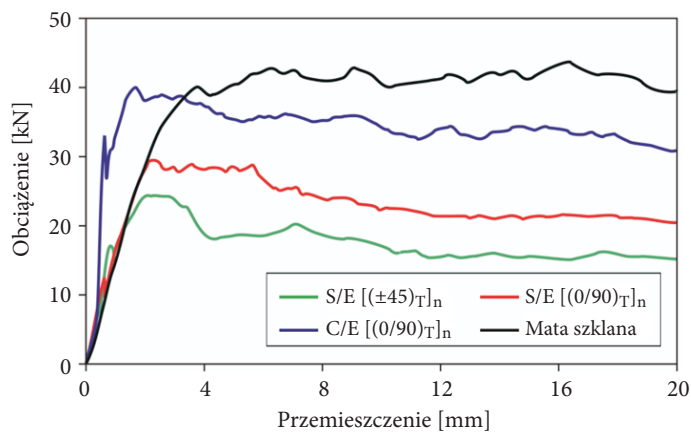
Na rysunku 5 przedstawiono zależności $P_{\text{nisz}}-\Delta l$, otrzymane z badań różnych struktur kompozytu epoksydowego w kształcie rurek. Z przedstawionych zależności, na uwagę zasługuje stosunkowo duża WEA kompozytu wzmocnionego matą szklaną.

Zaletą elementu o przekroju falistym jest duża sztywność na wyoboczenie, przy stosunkowo cienkiej powłoce.

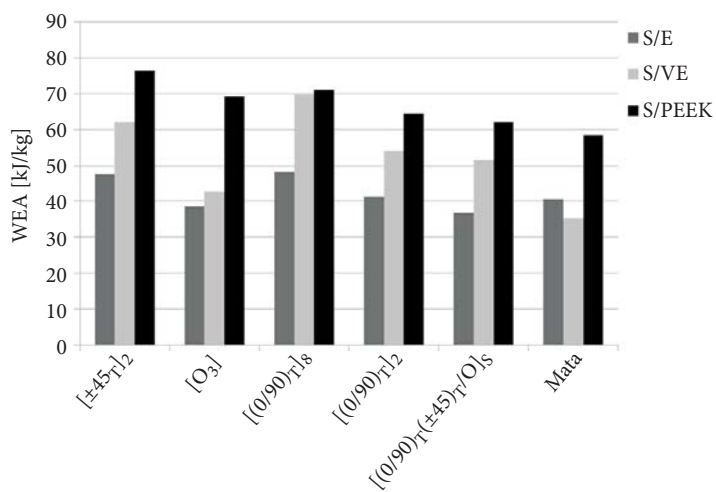


Rys. 5. Zależności $P-\Delta l$ dla próbek w kształcie rurek o różnych strukturach

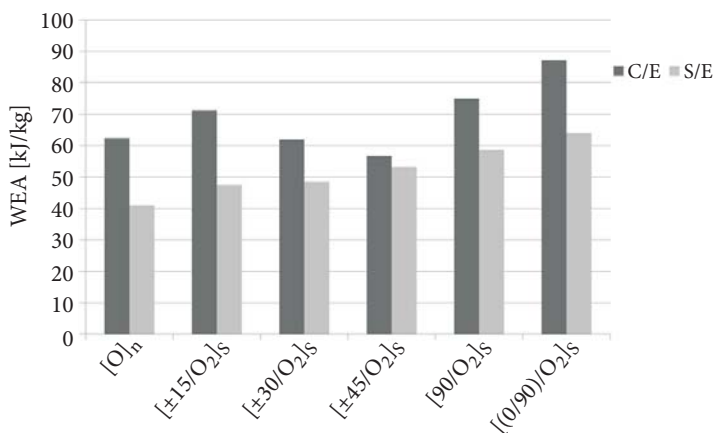
W badaniach powłok falistych stwierdzono, że wysoką EA otrzymano w wyniku niszczenia przez zginanie warstw i kruszenie ścianki, natomiast małą EA przy globalnym wyoboczeniu, które występuje przy bardzo cienkich ściankach. Największą WEA równą 73,1 kJ/kg otrzymano z badań kompozytu epoksydowego wzmocnionego tkaninami węglowymi o strukturze $[(0/90)_n]$, kompozytu wzmocnionego tkaniną szklaną o strukturze $[(0/90)_n]$ — 39,8 kJ/kg, podobnej wielkości wzmocniony matą szklaną — 39,2, a najmniejszą równą 30,6 wykazał kompozyt wzmocniony tkaniną szklaną o strukturze $[(\pm 45^\circ)_T]_n$ (rys. 6).



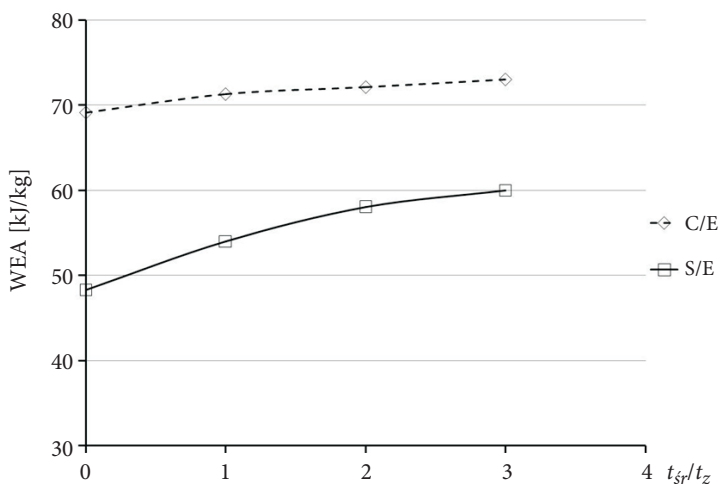
Rys. 6. Wykres $P-\Delta I$ — dla powłok falistych wykonanych z różnych struktur i rodzajów kompozytów



Rys. 7. Wpływ rodzaju osnow kompozytowych na WEA dla różnych struktur wzmocnionych włóknami szklanymi



Rys. 8. Wpływ rodzaju wzmocnień na WEA różnych struktur kompozytu epoksydowego wzmocnionego szklanymi pasmami rovingu



Rys. 9. Wpływ grubości warstwy środkowej na WEA kompozytów S/E i C/E w kształcie rurki o strukturze $(0/90)_T/O_n/(0/90)_T$ dla liczby warstw 0,0; 3,0; 6,0; 9,0; gdzie t_{sr} — grubość warstwy środkowej, t_z — grubość warstwy zewnętrznej kompozytu

4. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników badań, dotyczących elementów konstrukcji energochłonnych, można podać następujące wnioski:

1. Wpływ na wartość pochłanianej energii mają zarówno rodzaj kompozytu, jak i składniki, z których wykonany jest kompozyt — kompozyty epoksy-

- dowe wzmocnione włóknami węglowymi wykazują o 20% większą WEA od kompozytów epoksydowych wzmocnionych włóknami szklanymi;
2. Dla przyjętych do badań rodzajów kompozytów i struktur występuje jednoznaczny wzrost WEA wraz ze wzrostem grubości ścianki, który może być wykorzystany w konstrukcjach wymagających pochłaniania dużej energii uderzenia;
 3. Obwodowo zorientowane włókna w próbkach mają główny wpływ na obniżenie liczby pęknięć międzywarstwowych i ich długości, co powoduje wzrost energii absorbowanej. Próbki o strukturze $[(0/90)_T/0_n/(0/90)_T]$, której środkowa warstwa jest wzmocniona ciągłymi włóknami, wykazały podczas badań największą zdolność pochłaniania energii uderzenia;
 4. Wraz ze wzrostem połówkowego kąta stożka wartość WEA maleje i największą pochłanianą energię otrzymano przy kącie równym zero, czyli rurki;
 5. Zaletą elementów energochłonnych o kształcie stożków, oprócz tego, że nie wymagają wykonania inicjatorów w postaci faz na krawędzi, jest także to, że niszczą się według mechanizmu progresywnego (nie występuje lokalne wyboczenie ścianek).
 6. Na wartość pochłaniania energii polimerowego kompozytu zasadniczy wpływ mają następujące czynniki: rodzaj włókna, rodzaj osnowy, orientacja włókien, postacie wzmocnień, sekwencja ułożenia warstw, zawartość włókien w kompozycie, kształt i geometria próbki.
 7. Energochłonna struktura powinna zawierać sztywne i wytrzymałe warstwy środkowe, a zewnątrz warstwy powinny dobrze przejmować obciążenia poprzeczne (obwodowe w przypadku rurki). Wpływ orientacji włókien w elemencie energochłonnym na WEA jest taki sam jak na wytrzymałość przy zginaniu i ścinaniu. Największą WEA otrzymano dla elementu o strukturze $[(0/90)_T/0_n/(0/90)_T]$, w którym zewnętrzne warstwy wzmocnienia były wykonane z tkaniny, natomiast środkowa warstwa — z ciągłych włókien ułożonych równoległe do kierunku siły ściskającej.
 8. Wraz ze wzrostem grubości ścianki rośnie WEA, ponieważ rośnie sztywność zginania, a w niszczeniu elementu przewagę ma niszczenie przez zginanie warstw. Wpływ na wartość WEA stosunku grubości warstwy środkowej do warstw zewnętrznych kompozytu epoksydowego wzmocnionego włóknami węglowymi jest mały, natomiast wzmocnionego włóknami szklanymi jest znaczny.
 9. Największą WEA wykazują elementy w kształcie rurek, nieco mniejszą stożki ścięte, a następnie płaskie w kształcie cienkiego prostopadłościanu o przekroju falistym i najmniejszą — elementy w kształcie sfery. Niższa WEA elementów w kształcie stożków ściętych jest spowodowana tym, że tylko składowa siły ściskającej działa wzdłuż ścianki elementu. WEA stożków maleje wraz ze wzrostem kąta połówkowego stożka.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2009 r.

LITERATURA

- [1] A. H. FAIRFULL, D. HULL, *Effects of specimen dimensions on the specific energy absorption of fibre composite tubes*, ICCM 6, 3.36-3.45, London, 1987.
- [2] P. H. THORNTON, *Energy absorption in composite structures*, Journal of Composite Materials, 1979, 248-262.
- [3] P. H. THORNTON, P. J. EDWARDS, *Energy absorption in composite tubes*, Journal of Composite Materials, 1982, 521-545.
- [4] P. H. THORNTON, J. J. HARWOOD, P. BEARDMORE, *Fiber-reinforced plastic composites for energy absorption purposes*, Composite Science and Technology, 1985, 275-298.
- [5] G. L. FARLEY, *Energy absorption of composite materials*, Journal of Composite Materials, 1983, 267-279.
- [6] G. L. FARLEY, R. M. JONES, *Prediction of the energy absorption capability of composite tubes*, Journal of Composite Materials, 1992, 388-404.
- [7] D. HULL, *A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes*, Composites Science and Technology, 40, 1991, 377-421.
- [8] S. OCHELSKI, P. GOTOWICKI, *Porównanie zdolności pochłaniania energii kompozytów winyloestrowych z epoksydowymi*, Biul. WAT, 57, 2, 650, 2008, 7-15.
- [9] S. OCHELSKI, P. GOTOWICKI, *Doświadczalna ocena zdolności pochłaniania energii kompozytów węglowo-epoksydowych i szklano-epoksydowych*, Biul. WAT, 56, 1, 649, 2007, 141-158.
- [10] S. OCHELSKI, P. GOTOWICKI, P. BOGUSZ, *Experimental suport for numerical simulations of energy absorbing structures*, J. of KONES Powertrain and Transport, 2008, 183-217.
- [11] S. OCHELSKI, P. GOTOWICKI, *Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites*, Composite Structures, 1, 2008.

S. OCHELSKI

Influence of polymer composite structure on impact energy absorption

Abstract. This paper presents the experimental research of the energy absorption capability of the polymer composites reinforced with carbon and glass fibres, with different structure types. The following factors were investigated: reinforcing fibre types, structure, specimen geometry and shape, fibre orientation in the plies and ply sequence. The influence of the ply thickness in the specimens with different structures on the amount of absorbed impact energy was examined.

Keywords: polymer composites, absorbed energy, experimental mechanics

Universal Decimal Classification: 678.7.01

