



Wpływ prędkości obciążenia na zdolność pochłaniania energii kompozytowych elementów energochłonnych

STANISŁAW OCHELSKI, PAWEŁ BOGUSZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2,
sochelski@wat.edu.pl, pbogusz@wat.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki doświadczalnych badań wpływu prędkości uderzenia na energię absorbowaną (EA) przez kompozyty epoksydowe wzmocnione włóknami szklanymi i węglowymi o różnej strukturze. Przegląd literatury pokazał, że wpływ prędkości obciążenia na EA jest niejednoznaczny. W niektórych pracach stwierdzono, że EA nie zależy od prędkości uderzenia, natomiast w innych pracach — że EA rośnie lub maleje wraz ze wzrostem prędkości. Kompozyty polimerowe są tworzywami lepkosprężystymi, których właściwości mechaniczne (wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie i moduły sprężystości) silnie zależą od prędkości odkształceń. Badaniom energochłonnym poddano próbki wykonane z kompozytów epoksydowych wzmocnionych matą szklaną i tkaniną szklaną o strukturze $[(\pm 45)_T]_n$, które mają wysokie właściwości lepkosprężyste, a także kompozyty wzmocnione włóknami szklanymi i węglowymi o strukturze $[(0/90)_T]_n$, w których dominują właściwości sprężyste. Próby przeprowadzono w zakresie prędkości 0,0007-14,7 m/s.

Słowa kluczowe: właściwości mechaniczne, energia absorbowana, kompozyty

1. Wstęp

Konstrukcje energochłonne ze swej natury narażone są na obciążenia udarowe. Pochłanianie energii uderzenia polega na zamianie ujemnego jej przyrostu na pracę niszczenia konstrukcji energochłonnej. Kompozyty polimerowe są często używane do wytwarzania struktur energochłonnych, ponieważ charakteryzują się bardzo małą gęstością i w wyniku tego bardzo wysokim stosunkiem energii absorbowanej do masy. Ogólnie materiały te charakteryzują się właściwościami zależnymi od prędkości odkształceń. We wstępnej fazie projektowania można

wykorzystać właściwości materiałowe określone na podstawie badań statycznych, które są zwykle znacznie łatwiej dostępne, jednak w docelowych opracowaniach powinien znaleźć się model odzwierciedlający zachowanie się kompozytu w warunkach obciążeń dynamicznych.

Dokonano przeglądu prac dotyczących badań wpływu prędkości uderzenia na EA kompozytów epoksydowych wzmocnianych włóknami szklanymi lub węglowymi o różnej strukturze. Wyniki badań wybranych prac zestawiono w tabeli 2, w której podano: kształt próbek, rodzaj kompozytu, postać wzmocnienia, zakres zmiany prędkości obciążenia i jej wpływ na przyrost EA oraz powołanie na literaturę.

Przeanalizowane rezultaty badań pokazują brak jednoznacznego wpływu prędkości uderzenia na wartość EA.

W pracach [2, 3, 4 i 5] przebadano rurki kompozytowe z żywicy epoksydowej i tkaniny szklanej o różnej strukturze i przekroju (tab. 1). Wykazano w nich brak wpływu prędkości obciążenia na EA dla tego typu kompozytów. W pracy [12] stwierdzono, że EA rurek szklano-epoksydowych rośnie wraz ze wzrostem prędkości obciążenia o 20%. Schmueser i Wickcliffe [10] przebadali rurki szklano-epoksydowe o strukturze $[0_2/\pm 45_9]$, statycznie i przy prędkościach 5-6 m/s. Wykazano spadek EA o 25%. W [10] udowodniono, że połączenie aluminium i kompozytu szklano-epoksydowego powoduje wzrost EA wraz ze wzrostem prędkości obciążenia.

W [1, 2, 6 i 9] wykazano brak wpływu prędkości na EA kompozytów epoksydowych wzmocnianych włóknami węglowymi. W pracach tych przeanalizowano struktury $[0/\pm\theta]_n$, które nie były podejmowane w niniejszym opracowaniu.

W publikacji [7] autorzy przebadali rurki z żywicy epoksydowej wzmocnionej włóknami węglowymi o strukturze $[\pm 45]_n$, w zakresie prędkości 0,04-12 m/s. Wykazano spadek EA aż o 26%. Farley w [9] prezentuje wyniki dla kompozytów węglowo-epoksydowych $[\pm\theta]_n$ (w tym również $[\pm 45]_n$) przebadanych w zakresie 0,01-12 m/s, z których wynika, że EA dla tych kompozytów rośnie wraz ze wzrostem prędkości o 35%. Z kolei dla kompozytów węglowo-epoksydowych $[0/\pm\theta]_n$ Farley wykazał brak wpływu prędkości na EA.

Dla kompozytów wzmocnianych włóknami ciągłymi ułożonymi pod różnymi kątami w [1] i [9] Farley zanotował brak wpływu prędkości na EA lub jej wzrost (w zależności od struktury kompozytu). Podobne wyniki otrzymali Fairull i Hull w [6].

Schmueser i Wickcliffe [10] także badali WEA przy obciążaniu dynamicznym (5-6 m/s) i — dla porównania — przy obciążeniu statycznym rurki z kompozytów węgiel/epoksyd o strukturze $[0_2/(\pm 45)_9]$. W kilku przypadkach EA określona z badań dynamicznych stanowiła około 75% odpowiednich EA określonych statycznie. Schultz [8] przebadał kompozyt epoksydowy wzmocniony tkaniną węglową w zakresie prędkości 0,7-5,4 m/s. Autor wykazał spadek EA aż o 52%.

TABELA 1

Zestawienie wpływu prędkości uderzenia na EA kompozytów epoksydowych

Lp.	Rodzaj kompozytu	Postać próbek i wzmocnienia	Struktura wzmocnienia	Prędkość obciążenia [m/s]	Przyrost ΔEA [kJ] w %	Literatura
2	C/E	tkanina modułowa	$[0/\pm 45^\circ]_2$ $[0/\pm 45^\circ]_3$ $[0/\pm 75^\circ]_3$	0,01-13,0	0,0	[1]
3	C/E S/E	rurki, włókna ciągłe	$[0/\pm \theta^\circ]_4$	statyczna -dynamiczna	0,0	[2]
4	C/E S/E	rurki o przekroju pierścieniowym i kwadratowym, prostopadłościany	różna	statyczna -dynamiczna	0,0	[3]-[5]
5	C/E	rurki, włókna ciągłe	$[0/\pm \theta^\circ]$	statyczna -dynamiczna	0,0	[6]
6	C/E	rurki, włókna ciągłe	$[\pm \theta^\circ]$	statyczna -dynamiczna	rośnie	[6]
7	C/E	rurki, tkanina węglowa	$[\pm 45^\circ]_3$	0,04-12,0	-26%	[7]
8	C/E	rurki o przekroju kwadratowym, tkanina węglowa	$[0/90^\circ]_5$	0,7-5,4	-52,7%	[8]
14	C/E	rurki, włókna ciągłe	$[0/\pm \theta^\circ]_2$ $\Theta = 15; 45; 75$	0,01-12,0	0,0	[9]
15	C/E	rurki, włókna ciągłe	$[\pm \theta^\circ]_2$ $\Theta = 15; 45; 75$	0,01-12,0	+35%	[9]
16	C/E S/E	rurki	$[0_2/\pm 45_9]$	statyczne i 5-6	-25%	[10]
17	Al+S/E	rurki aluminiowe o średnicy 47 mm, które oplatanie kompozytem	$[15^\circ]_n, [\pm 45^\circ]_n,$ $[90^\circ]_n$ (n = 3 i 6 warstw)	statyczne i 5,5	+10,3-14,5%	[10]
18	Gr/E S/E	struktury kompozytowe	$[0/90^\circ]$	statycznie i 8,5	rośnie	[3]
20	S/E	rurki kompozytowe		0,00033-4	+20%	[12]

gdzie: C/E — kompozyt epoksydowy wzmocniony włóknami węglowymi, S/E — wzmocniony włóknami szklanymi, K/E — wzmocniony włóknami kevlarowymi, S/P — kompozyt poliestrowy wzmocniony włóknami szklanymi i S/V — kompozyt winylestrowy wzmocniony włóknami szklanymi

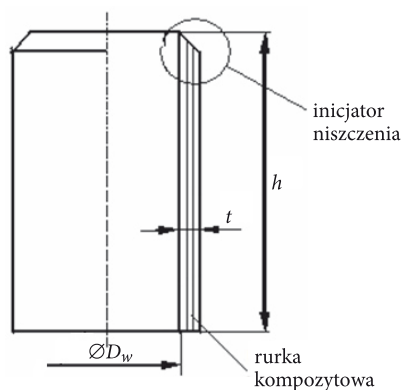
Ogólnie, efekt zależny jest od rodzaju kompozytu, struktury kompozytu, od kolejności ułożenia warstw różnie zorientowanych w kompozycie. Analizę literatury utrudnia fakt, że próbki przebadane w różnych laboratoriach i warunki

przeprowadzania eksperymentu są znacznie różne w każdej pracy. Spotyka się sprzeczne wyniki dla pozornie identycznych rodzajów kompozytów. Często prezentowane w pracach dane na temat użytych w kompozycie materiałów są niepełne. Różny jest zakres analizowanych prędkości obciążenia.

2. Materiały i metody badań

Energochłonnym badaniom statycznym i dynamicznym przy zmiennej wartości prędkości obciążenia poddano próbki w kształcie tulejek wykonanych z kompozytów z żywicy epoksydowej EPIDIAN E53 o różnych rodzajach wzmocnienia. Kompozyty wzmocnione zostały: tkaniną szklaną marki STR-012-350-110 firmy Krosoglass, o gramaturze 350 g/m^2 i strukturze $[(0/90)_T]_n$; włóknami ciętymi w postaci maty szklanej o gramaturze 316 g/m^2 i włóknami węglowymi w postaci tkaniny marki ECC 442 z włókien TENAX HTA 5131 o strukturze $[(0/90)_T]_n$.

Próbki miały średnicę wewnętrzną 40 mm i wysokość 50 mm. Przebadano tulejki w zakresie grubość ścianek od 1,5 do 5 mm. Na jednej z krawędzi wykonano ściecia pod kątem 45° spełniające funkcję inicjatora niszczenia, które zapewniają progresywne niszczenie próbek. Kształt i wymiary badanych próbek przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat tulejki kompozytowej w dynamicznych badaniach energochłonności

Ze względu na szeroki zakres prędkości obciążenia (0,0007 do 14 m/s), próby energochłonne przeprowadzono na trzech różnych stanowiskach badawczych. Na maszynie wytrzymałościowej Instron 8802 przeprowadzono badania statyczne do prędkości obciążenia 60 mm/min. Badania realizowane były przy stałej prędkości obciążenia. Na młocie udarowym Instron Dynatup 9250HV (o zakresie energii kinetycznej do 0,9 kJ) i na sprężynowym młocie udarowym produkcji własnej (o zakresie do 17 kJ) przeprowadzono udarowe badania dynamiczne przy

prędkościach około kilkunastu metrów na sekundę. Przy obciążeniach uderowych wyznaczano prędkość początkową uderzenia.

W tabeli 2 przedstawiono szczegółowo opis struktur i wymiarów badanych próbek. Podano zakresy prędkości obciążeń i rodzaje użytych stanowisk badawczych.

TABELA 2
Zestawienie próbek kompozytowych do dynamicznych badań energochłonności

Rodzaj kompozytu	Struktura	Kształt próbki	Grubość ścianki tulejki [mm]	Prędkości obciążenia [m/s]	Stanowisko badawcze
S/E	tkanina [(0/90) _T] _n	rurka	1,5; 2,0; 2,5; 4,0	0,0007; 0,06; 4,5-6,0	Instron 8802, sprężynowy młot uderowy
S/E	tkanina [(±45) _T] _n	rurka	3,0	0,0007; 0,01; 0,06	Instron 8802
S/E	mata	rurka	2,3; 4,5	0,0007; 0,06; 5,3-7,0; 8,4; 14,7	Instron 8802, sprężynowy młot uderowy, Instron Dynatup 9250HV
C/E	tkanina [(0/90) _T] _n	rurka	1,5; 2,0; 3,0	0,0007; 0,06; 4,5-7,5	Instron 8802, sprężynowy młot uderowy

3. Wzory zastosowane w obliczeniach wyników

Analizie poddano energię absorbowaną (EA) i względną energię absorbowaną (WEA) przebadanych kompozytów epoksydowych. Energia absorbowana EA została obliczona poprzez numeryczne całkowanie pola pod wykresami siła–przemieszczenie, zgodnie ze wzorem:

$$EA = \int_0^l P dl, \quad (1)$$

gdzie P oznacza siłę niszczącą, a dl niewielki przyrost drogi niszczenia (skrótanie próbki).

Względna energia absorbowana WEA została obliczona jako iloraz EA do masy zniszczonej części próbki. Procentowy przyrost WEA odnoszono do wyników badań quasi-statycznych otrzymanych przy prędkości obciążenia 0,0007 m/s.

Wyznaczono siłę maksymalną P_{\max} i siłę średnią $P_{\text{śred}}$.

4. Wyniki badań

W tabelach 3-5 zestawiono wyniki badań energochłonnych wpływu prędkości obciążenia na zdolność pochłaniania energii przez badane kompozytowe elementy energochłonne. Podano opis rodzaju i struktury kompozytu, prędkość początkową obciążenia V_{pocz} (stałą lub początkową prędkość uderzenia), siłę maksymalną P_{max} , siłę średnią $P_{śred}$, energię absorbowaną EA. W ostatnich kolumnach przedstawiono wartości względnej energii absorbowanej WEA i przyrost WEA w stosunku do wartości uzyskanych z prób statycznych. Przedstawione wyniki są średnią algebraiczną z trzech wykonanych dla każdego rodzaju próbek.

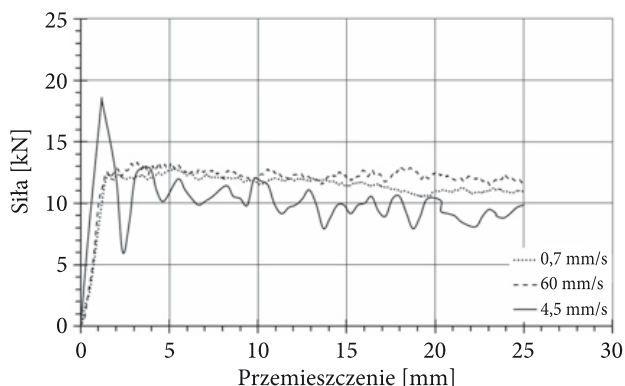
W tabeli 3 przedstawiono wyniki badań dla kompozytu epoksydowego wzmocnionego włóknami szklanymi (S/E) w postaci tkaniny o strukturze $[(0/90^{\circ})_T]_n$ i $[(\pm 45)_T]_n$. Wpływ prędkości obciążenia na energię absorbowaną zależy od struktury kompozytu. W badaniach kompozytu S/E $[(0/90^{\circ})_T]_n$ przy prędkościach obciążenia kilku metrów na sekundę odnotowano spadek energii absorbowanej w porównaniu z badaniami statycznymi, średnio o 9%. Przy obciążeniu o prędkości 60 mm/s EA wzrosła średnio o 6,7%. Na rysunku 2 przedstawiono wykres dla próbek poddanych obciążeniu o różnej prędkości.

TABELA 3
Wyniki badań energochłonnych rurek z kompozytu epoksydowego wzmocnianego tkaniną szklaną

Rodzaj struktur	V_{pocz} [m/s]	t [mm]	P_{max} [kN]	$P_{śred}$ [kN]	EA [kJ]	WEA [kJ/kg]	Δ WEA [%]
$[0/90]_T$	0,0007	1,5	12,7	11,0	0,33	48,0	-
$[0/90]_T$	0,06	1,5	14,0	12,3	0,37	53,2	10,8
$[0/90]_T$	4,5	1,5	17,1	10,2	0,29	44,4	-7,5
$[0/90]_T$	0,0007	2,5	28,5	24,8	0,74	51,9	-
$[0/90]_T$	0,06	2,5	25,7	23,3	0,70	53,2	2,5
$[0/90]_T$	6,0	2,5	37,9	22,0	0,62	46,0	-4,2
$[\pm 45]_T$	0,0007	3,0	29,5	24,5	0,596	45,2	-
$[\pm 45]_T$	0,01	3,0	35,4	30,0	0,899	55,2	22,2
$[\pm 45]_T$	0,06	3,0	33,5	30,1	0,911	55,9	23,8

Literatura przedmiotu wykazuje sprzeczne wyniki dotyczące kompozytu szklano-epoksydowego. W przeważającej części publikacji mówi się o braku wpływu prędkości na EA [2, 3, 4, 5].

Kompozyt S/E o strukturze $[(\pm 45)_T]_n$, badany w przedziale małych prędkości, od 0,0007 do 0,06 m/s, wykazał wyraźny wzrost siły niszczącej przy wzroście



Rys. 2. Porównanie zależności siły niszczącej od przemieszczenia dla próbek z kompozytu S/E o strukturze $[(0/90)_T]_n$ o grubości ścianki 1,5 mm przy różnych prędkościach obciążenia

prędkości obciążenia (wzrost EA o 20%). W [10], gdzie przebadano struktury $[0_2/\pm 45_9]$, zanotowano spadek EA o 25%. W tym przypadku struktura wzmocnienia zawierała również włókna ciągłe.

W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań energochłonnych dla kompozytu epoksydowego wzmocnionego włóknami węglowymi (C/E), w postaci tkaniny o strukturze $[(0/90)_T]_n$. Wykresy z badań energochłonnych tego kompozytu przedstawiono na rysunku 3. Przy dużych prędkościach uderzenia zaobserwowano spadek siły niszczącej, a za tym i EA średnio o 17,6%. Warto zauważyć, że wyraźny spadek pochłanianej energii dotyczy próbek niszczonej z maksymalną prędkością obciążenia (kilka m/s) i jest tym większy, im większa jest grubość ścianki tulejki. Dla próbki o grubości 3 mm EA zmniejszyła się o 22% w stosunku do wyniku z prób statycznych. W badaniach przy prędkości 60 mm/s różnice w EA są niewielkie i wynoszą kilka procent. Podobną prawidłowość (w dużo mniejszym stopniu) można zauważyć w wynikach badań próbek szklano-epoksydowych o strukturze $[(0/90)_T]_n$ (tab. 3).

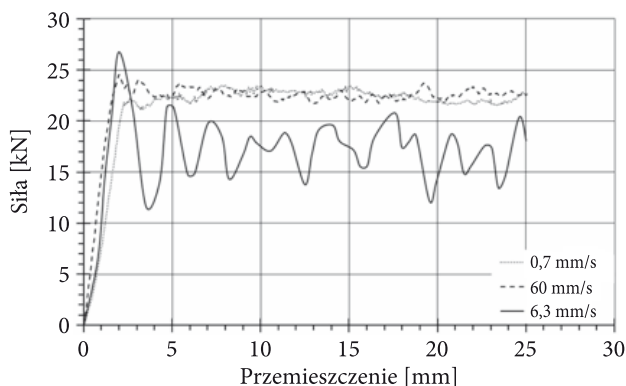
TABELA 4

Wyniki badań energochłonnych rurek z kompozytu epoksydowego wzmocnianego tkaniną węglową

Rodzaj struktury	$V_{pocz.}$	t	P_{max}	$P_{\text{śred}}$	EA	WEA	ΔWEA
	[m/s]	[mm]	[kN]	[kN]	[kJ]	[kJ/kg]	[%]
$[0/90]_T$	0,0007	1,5	18,0	16,0	0,48	69,8	-
$[0/90]_T$	0,06	1,5	18,6	15,7	0,47	68,7	-1,6
$[0/90]_T$	4,5	1,5	26,9	14,1	0,40	63,1	-9,6
$[0/90]_T$	0,0007	2,0	23,2	20,6	0,62	67,4	-

cd. tabeli 4

$[0/90]_T$	0,06	2,0	24,6	22,0	0,66	72,1	7,0
$[0/90]_T$	6,3	2,0	31,7	17,3	0,48	60,5	-10,2
$[0/90]_T$	0,0007	3,0	43,8	38,4	1,15	78,6	-
$[0/90]_T$	0,06	3,0	46,0	40,0	1,20	81,5	3,7
$[0/90]_T$	7,5	3,0	54,1	29,4	0,82	57,4	-27,0



Rys. 3. Zależności siły niszczącej od przemieszczenia dla próbek C/E o grubości ścianki 2 mm przy różnych prędkościach obciążenia

Wyniki uzyskane w niniejszej pracy dla kompozytu epoksydowego wzmocnionego tkaniną węglową o strukturze $[(0/90)_T]_n$ pokrywają się z wynikami prezentowanymi w [8], gdzie odnotowano spadek EA. W [7] i [10] również zanotowano spadek EA dla kompozytów węglowo-epoksydowych, jednak przebadano inny rodzaj struktury wzmocnienia ($\pm 45^\circ$), a w [8] badano kształt rurek o przekroju kwadratowym.

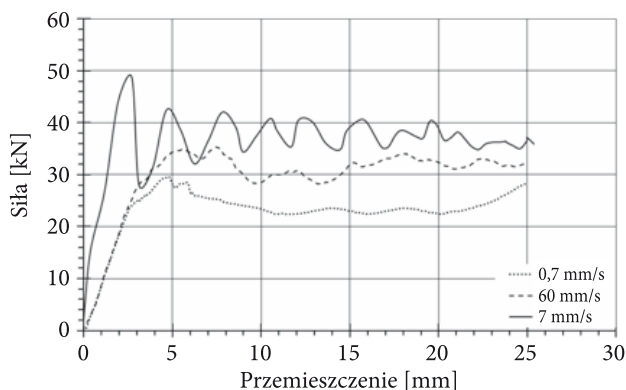
Wyniki badań wpływu prędkości obciążenia na zdolność pochłaniania energii dla kompozytu epoksydowego wzmocnionego matą szklaną (mata S/E) przedstawiono w tabeli 5. Zaobserwowano, że siła niszcząca (oraz EA) dla tych kompozytów zwiększa się wyraźnie wraz ze wzrostem prędkości obciążenia. Wyniki badań próbek o grubości ścianki 4,5 mm, pokazane na rysunku 4, wykazały wzrost EA o 46,5% w stosunku do wyników z prób statycznych.

Kompozyty epoksydowe wzmocnione matą — podobnie kompozyt szklano-epoksydowy o strukturze $[(\pm 45)_T]_n$ — wykazują bardzo duże właściwości lepko-sprężyste. Dla tego typu próbek stwierdzono wyraźny dodatni wpływ prędkości obciążenia na EA. Dla kompozytów wykazujących dominujące cechy sprężyste wyniki są niejednoznaczne. Wykazano brak wpływu lub spadek EA.

TABELA 5

Wyniki badań energochłonnych rurek z kompozytu epoksydowego wzmocnianego matą szklaną

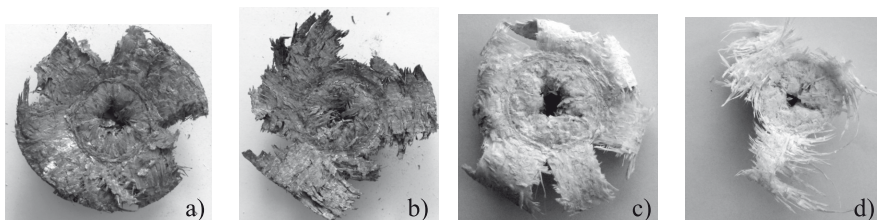
Rodzaj struktury	$V_{pocz.}$	t	P_{max}	P_{sred}	EA	WEA	ΔWEA
	[m/s]	[mm]	[kN]	[kN]	[kJ]	[kJ/kg]	[%]
mata S/E	0,0007	2,3	18,4	15,4	0,46	40	-
mata S/E	0,06	2,3	21,5	19,0	0,47	42,2	5,5
mata S/E	5,3	2,3	32,0	19,1	0,5	48,3	20,8
mata S/E	14,7	2,3	24,0	19,2	0,72	46,8	17,0
mata S/E	0,0007	4,5	29,5	23,0	0,69	30,8	-
mata S/E	0,01	4,5	33,9	29,5	0,89	39,7	22,3
mata S/E	0,06	4,5	38,2	31,1	0,91	40,7	24,8
mata S/E	7,0	4,5	48,3	37,7	0,94	50,4	49,0
mata S/E	8,4	4,5	42,7	32,5	0,72	48,3	43,8



Rys. 4. Zależności siły niszczonej od przemieszczenia dla próbek maty szklanej/epoksyd o grubości ścianki 4,5 mm przy różnych prędkościach obciążenia

Nie ma jednej ogólnej prawidłowości co do zachowania się kompozytu w warunkach obciążeń dynamicznych, w porównaniu do obciążeń statycznych. Dla każdego rodzaju kompozytu należy przeprowadzić oddzielną serię badań energochłonnych.

Wszystkie badane próbki niszczyły się progresywnie. Przykładowo na rysunku 5 przedstawiono zdjęcia zniszczonych próbek z kompozytów C/E i S/E o strukturze $[(0/90)_T]_n$ zniszczonych statycznie i dynamicznie. Mechanizm niszczenia próbki polega na kruszeniu i zginaniu zniszczonych warstw na zewnątrz i do wewnątrz rurki.



Rys. 5. Zdjęcia próbek z kompozytów: a) C/E zniszczonego statycznie; b) C/E zniszczonego dynamicznie; c) S/E zniszczonego statycznie; d) S/E zniszczonego dynamicznie

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań elementów konstrukcji energochłonnych wykonanych z kompozytów epoksydowych sformułowano następujące wnioski:

1. Wyniki badań własnych potwierdziły niejednoznaczny wpływ prędkości obciążenia na EA wykazany w przeglądzie literatury (patrz tab. 1). Spotyka się sprzeczne wyniki dla pozornie identycznych rodzajów kompozytów. Analizę literatury utrudnia fakt, że próbki przebadane w różnych laboratoriach i warunki przeprowadzania eksperymentu są różne w każdej pracy.
2. Wśród przebadanych kompozytów z dominującymi cechami lepkosprężystymi (kompozyty wzmocnione matą szklaną i tkaniną szklaną o strukturze $[(\pm 45^\circ)_T]_n$) stwierdzono wyraźny wzrost EA wraz ze wzrostem prędkości w przedziale 0,0007-14,7 m/s.
3. Kompozyty szklano-epoksydowe o strukturze $[(0/90)_T]_n$ okazały się być mało wrażliwe na zmiany prędkości obciążenia w zakresie prędkości 0,0007-6,0 m/s. Zauważono niewielki spadek EA przy dużych prędkościach obciążenia.
4. Wykazano spadek EA przy prędkości obciążenia 9,0 m/s dla kompozytów epoksydowych wzmocnionych tkaniną węglową $[(0/90)_T]_n$.
5. Wszystkie badane próbki niszczyły się progresywnie i wykazały mechanizm niszczenia przez kruszenie i zginanie zniszczonych warstw do wewnątrz i na zewnątrz rurki.

Artykuł wpłynął do redakcji 10.11.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lipcu 2011 r.

LITERATURA

- [1] G. L. FARLEY, *Relationship between mechanical-property and energy-absorption trends $0/\pm 45_2$, $0/\pm 75_2$ for composite tubes*, NASA-TP-3284, 1992.
- [2] G. L. FARLEY, *Energy absorption of composite materials*, Journal of Composite Materials, 17, 1983, 267-279.
- [3] P. H. THORNTON, *Energy absorption in composite structures*, Journal of Composite Materials, 13, 1979, 248-262.

- [4] P. H. THORNTON, P. J. EDWARDS, *Energy absorption in composite tubes*, Journal of Composite Materials, 16, 1982, 521-545.
- [5] P. H. THORNTON, J. J. HARWOOD, P. BEARDMORE, *Fiber-reinforced plastic composites for energy absorption purposes*, Composite Science and Technology, 24, 1985, 275-298.
- [6] A. H. FAIRFULL, D. HULL, *Energy absorption of polymer matrix composite structure: frictional effects*, Structural Failure, 1989, 521-545.
- [7] M. R. SCHULTZ, *Energy absorption capacity of graphite-epoxy composites tubes*, Engineering Mechanics, Blacksburg, Virginia, 1998.
- [8] A. G. MAMALIS, D. E. MANOLAKOS, M. B. IOANNIDIS, D. P. PAPAPOSTOLOU, *On the response of thin-walled CFRP composite tubular components subjected static and dynamic axial compressive loading: experimental*, Composite Structures, 69, 2005, 407-420.
- [9] G. L. FARLEY, *The effects of crushing speed on the energy-absorption capability of composite tubes*, Journal of Composite Materials, 25, 1991, 1314-1329.
- [10] D. W. SCHMUESER, L. E. WICKLIFFE, *Impact energy absorption of continuous fiber tubes*, Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 109, 1987, 72-77.
- [11] H. W. SONG, Z. M. WAN, Z. M. XIE, X. W. DU, *Axial impact and energy absorption efficiency of composite wrapper metal tubes*, Int. J. Impact Engineering, 24, 2000, 385-401.
- [12] R. KEAL, *Post failure energy absorbing mechanisms of filament wound composite tubes*, PhD Thesis, University of Liverpool, 1983.

S. OCHELSKI, P. BOGUSZ

Influence of loading rate on energy absorption capability of composite energy absorbing structures

Abstract. The paper presents the experimental investigations of influence of loading rate on the energy absorbed (EA) by selected polymer composites. There is a quite extensive literature examining this subject, but the obtained results do not reveal the unequivocal conclusions. In some cases, the loading rate does not influence the EA, in some cases a rising loading rate increases or decreases the EA. Due to viscoelastic properties of polymer composites, their mechanical properties (tensile strength, compression strength, elastic modulus) are strongly influenced by the loading rate.

The work deals with energy absorbing tests of epoxy composites in the shape of tubes with different reinforcement orientation (different viscoelastic properties). Specimens made of epoxy resin reinforced with glass fibres in the form of fibre mats and fabrics $[(\pm 45)T]_n$ have strong viscoelastic properties. Composite reinforced with glass and carbon fabrics $[(0/90)T]_n$ are mainly characterized by elastic properties. The energy absorbing tests were performed in the loading rate range from 0.0007 to 14.7 m/s.

Keywords: mechanical properties, absorbed energy, polymer composites, experimental mechanics, dynamic investigations

