



Wpływ wypełnienia rurek elastomerami na mechanizm niszczenia i wartość energii absorbowanej

STANISŁAW OCHELSKI, PAWEŁ BOGUSZ

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

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych elastomerów o twardościach: 40, 60, 70 i 90 w stopniach określonych metodą Shore'a w skali A. Z badań energochłonnych rurek kompozytowych wypełnionych elastomerami określono wpływ stopnia wypełnienia rurek i twardości elastomeru na wartość pochłanianej energii uderzenia. Przedstawiono też mechanizm niszczenia próbek oraz określono właściwości mechaniczne elastomerów o różnej twardości z prób rozciągania, ściskania i obciążenia okresowo zmiennego.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, energia absorbowana, elastomery, właściwości mechaniczne, mechanika doświadczalna

1. Wstęp

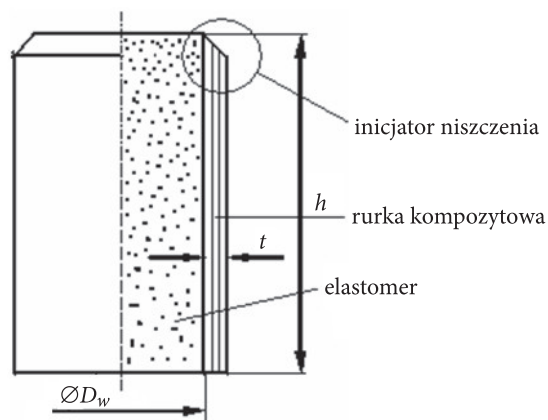
Elastomery wykazują stan wysokoelastyczny, szczególnie gdy mają twardość rzędu 40°ShA i podczas rozciągania niszczą się przy odkształceniach większych od 200%. W pracy [1] zakłada się, że elastomery są materiałami izotropowymi, dla których współczynnik Poissona wynosi 0,5 oraz że elastomery mają strukturę molekularną podobną do gumy. Obszerne dane dotyczące gumy przedstawiono w pracy [2].

Do badań właściwości mechanicznych elastomerów wykorzystano następujące normy: PN-ISO 37 „Guma i kauczuk termoplastyczny — Oznaczenie właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu”; PN-54/C-04253 „Guma — Oznaczenie odkształcenia przy ściskaniu”; PN-80/C-04290 „Guma — Oznaczenie trwałego odkształcenia przy ściskaniu”; PN-78/C-04338 „Guma — Oznaczenie odporności na wielokrotne rozciąganie”.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki doświadczalnych badań wpływu wypełnienia rurek elastomerami na zdolność pochłaniania energii uderzenia. Próbkę w kształcie rurek wykonanych z kompozytu epoksydowego wzmocnionego tkaninami z włókien węglowych i szklanych wypełniano elastomerami o twardościach: 40, 60, 70 i 90°ShA. Ponieważ elastomery są przeważnie wykorzystywane w konstrukcjach przeznaczonych do tłumienia udarowego obciążenia, a niszczone rurki pochłaniają energię uderzenia, przeprowadzone badania mają wykazać, jakie efekty powoduje wypełnienie rurek elastomerami, oraz określić wpływ twardości elastomeru na zdolność pochłaniania energii. Określono też właściwości mechaniczne przyjętych do badań elastomerów, a w szczególności stałe sprężystości i wytrzymałość przy rozciąganiu i ściskaniu oraz właściwości tłumiące w zależności od częstotliwości zmian obciążenia.

2. Przedmiot i metoda badań

Elastomery o twardościach w °ShA: 40; 60; 70; 90° wytworzone były przez Spółdzielczy Ośrodek Technologii Gumy w Szczecinie z kauczuku nitylowego, stearyny, bieli cynkowej, środka przeciwstarzeniowego, sadzy, zmiękczacza, siarki i przyspieszacza organicznego.



Rys. 1. Kształt próbek zastosowanych w badaniach energochłonnych kompozytów wypełnionych elastomerami

Przyjęty do badań energochłonnych kształt próbek przedstawiono na rysunku 1. Do wytworzenia próbek przyjęto na osnowę żywicę epoksydową E-53 i włókna w postaci tkaniny szklanej rowingowej o gramaturze 350 g/m² marki STR-012-350-110 lub tkaniny węglowej marki TENAX HTA. Warstwy tkanin zostały ułożone pod kątem 0/90° względem osi próbki. Przyjęto następujące wymiary tulejek

kompozytowych: średnica wewnętrzna $\varnothing 40$ mm oraz długości 50 mm. W celu zbadania wpływu grubości na mechanizm niszczenia i wartość energii absorbowanej (EA) ustalono następujące grubości ścianek rurek: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 i 4,0 mm. Próbki wytworzono metodą laminowania ręcznego opisaną w pracy [4].

Moduł sprężystości wzdłużnej wyznaczono z badań okresowo zmiennych obciążeń. E_1 przyjęto jako część rzeczywistą modułu zespolonego, czyli moduł zachowawczy. Obliczono współczynniki stratności mechanicznej ($\text{tg}\phi$) i współczynniki rozproszenia energii (ψ) dla wszystkich rozpatrywanych twardości elastomerów.

Współczynnik rozproszenia energii jest określany jako:

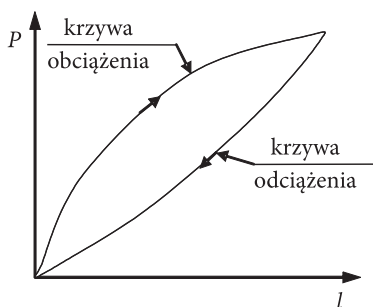
$$\psi = \frac{w_2}{w_1} = \frac{L_{ob} - L_{od}}{L_{ob}}, \quad (1)$$

gdzie: w_2 — energia rozproszona, czyli energia dyssypacji jednego cyklu obciążeń;
 w_1 — energia odkształcenia sprężystego.

Energie w_2 i w_1 określa się z pętli histerezy: L_{ob} — praca obciążenia, L_{od} — praca odciążenia (rys. 2). Prace określa się ze wzorów:

$$L_{obc} = \int_0^l P_{obc} dl, \quad (2)$$

$$L_{odc} = \int_0^l P_{odc} dl. \quad (3)$$



Rys. 2. Pętla histerezy dla symetrycznego cyklu obciążenia dostosowana do obliczeń L_{obc} i L_{odc}

Pomiędzy współczynnikiem rozproszenia energii a współczynnikiem stratności mechanicznej istnieje zależność.

$$\psi = 2\pi \cdot \text{tg}\phi. \quad (4)$$

3. Wyniki badań

Wyniki badań właściwości mechanicznych z badań elastomerów o różnych twardościach, które zaczerpnięto z pracy [3], przedstawiono w tabeli 1. Z badań statycznych określono naprężenia, z prób rozciągania i ściskania, w zależności od odkształceń, oraz stałe sprężystości. Natomiast z prób przy obciążeniach okresowo zmiennych określono właściwości tłumiące badanych elastomerów w postaci współczynnika rozproszenia energii i współczynnika stratności mechanicznej.

TABELA 1

Właściwości mechaniczne określone w badaniach elastomerów

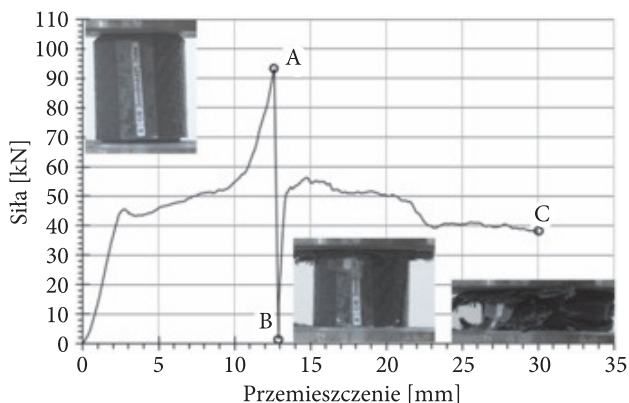
Lp.	Wielkości określone w badaniach	Twardość w °ShA				Częstotliwość w Hz
		40	60	70	90	
1	Wytrzymałość na rozciąganie (R_c) [MPa]	1,95 ($\epsilon = 2,5$)	7,8 ($\epsilon = 2,5$)	9,0 ($\epsilon = 2,5$)	12,7	–
2	Umowna wytrzymałość na ściskanie (R_c) [MPa]	2,5 ($\epsilon = 0,5$)	4,5 ($\epsilon = 0,5$)	6,0 ($\epsilon = 0,5$)	14,6 ($\epsilon = 0,5$)	–
3	Moduł zachowawczy (E_1) [MPa]	21,4	28,5	36,6	73,5	–
4	Moduł rozproszenia (E_2) [MPa]	0,783	1,18	1,92	3,7	–
5	Moduł sprężystości poprzecznej (G) [MPa]	7,13	9,5	12,2	24,5	–
6	Współczynnik Poissona (ν)	0,493	0,497	0,498	0,498	–
7	Współczynnik rozproszenia energii (ψ)	0,24	0,26	0,34	0,35	0,01
		0,23	0,26	0,33	0,316	0,1
		0,206	0,142	0,32	0,302	1,0
		0,2	0,108	0,28	0,292	3,0
8	Współczynnik stratności mechanicznej ($tg\varphi$)	0,0382	0,0414	0,054	0,056	0,01
		0,0366	0,0414	0,0525	0,0503	0,1
		0,0328	0,0226	0,0509	0,048	1,0
		0,0318	0,0172	0,0446	0,046	3,0

W przypadku próbek rozciąganych, ze względu na ograniczony ruch tłoka maszyny wytrzymałościowej, podano w tabeli naprężenia przy odkształceniach 250%.

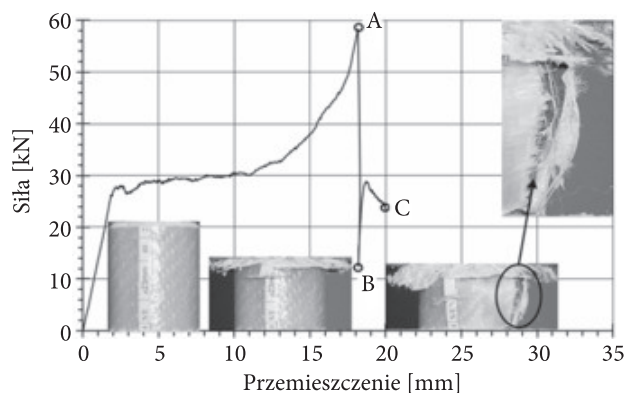
Wyniki badań energochłonnych próbek w postaci rurek wykonanych z tkaniny węglowej w osnowie z żywicy epoksydowej (C/E) oraz z tkaniny szklanej w osnowie

z żywicy epoksydowej (S/E), o różnym stopniu wypełnienia elastomerami i o różnej twardości, przyjęto jako średnie z trzech prób, które zestawiono w tabelach 2 i 3. Na rysunkach 3-10 przedstawiono przykładowo kilka próbek o różnym składzie. Wypełnione rurki o różnej grubości ścianek i różnym stopniu wypełnienia były badane na maszynie INSTRON 8802, przy obciążeniach quasi-statycznych z prędkością ruchu tłoka maszyny wytrzymałościowej wynoszącą 40 mm/min. Stopień wypełnienia elastomerami próbek jest określony przez procentowe wypełnienie wewnętrznej objętości rurki przez elastomer o różnej wielkości perforacji (zmienną jest liczba i średnica otworów wykonanych w elastomerach).

Oznaczenia na rysunkach 3 i 4 opisują punkty charakterystyczne wykresów. Fragment krzywej od początku układu współrzędnych do punktu A (odcinek 0A) odzwierciedla niszczenie progresywne próbki. Odcinek AB przedstawia pęknięcie



Rys. 3. Zależność siła–przemieszczenie próbki C/E o grubości ścianki 3,0 mm, 70,5% wypełnienia elastomerem o twardości 40°



Rys. 4. Zależność siła–przemieszczenie dla próbki S/E o grubości ścianki 2,0 mm, 65,2% wypełnienia elastomerem o twardości 40°ShA

rurki kompozytowej wzdłuż jej wysokości (przedstawione na zbliżeniu rysunku 4), któremu towarzyszy nagły spadek siły niszczącej. Odcinek BC przedstawia ściskanie elastomeru oraz fragmentów pękniętej rurki.

TABELA 2

Wyniki badań energochłonnych rurek C/E wypełnionych elastomerami

Rodzaj kompozytu	Grubość ścianki rurki	Stopień wypełnienia	Siła maksymalna	Skrócenie próbki	Twardość elastomeru	EA	Rodzaj kompozytu	Grubość ścianki rurki	Stopień wypełnienia	Siła maksymalna	Skrócenie próbki	Twardość elastomeru	EA
	[mm]	[%]	[kN]	[mm]	[°ShA]	[kJ]		[mm]	[%]	[kN]	[mm]	[°ShA]	[kJ]
C/E	1	100	30,3	3,6	40	0,05	C/E	2	100	74,9	4,3	70	0,14
C/E	1	73,4	22,0	11,1	40	0,19	C/E	2	73,4	53,4	13,1	70	0,51
C/E	1	70,5	25,9	14,2	40	0,25	C/E	2	70,5	53,5	14,1	70	0,55
C/E	1	65,2	20,7	17,7	40	0,30	C/E	2	65,2	51,1	16,2	70	0,60
C/E	1	58,9	19,9	20,1	40	0,33	C/E	2	58,9	43,1	19,5	70	0,72
C/E	1	48,5	19,6	28,1	40	0,44	C/E	2	48,5	46,4	26,6	70	0,88
C/E	1	36,8	15,9	30,0	40	0,42	C/E	2	36,8	38,9	30,0	70	0,97
C/E	1	0	15,93	30,0	brak	0,41	C/E	2	100	68,0	2,6	90	0,16
C/E	1	100	30,3	3,4	60	0,04	C/E	2	65,2	67,8	15,0	90	0,61
C/E	1	73,4	27,4	10,9	60	0,22	C/E	2	58,9	63,7	18,1	90	0,75
C/E	1	70,5	26,6	15,0	60	0,30	C/E	2	36,8	47,6	19,6	90	0,73
C/E	1	48,5	21,4	22,0	60	0,41	C/E						
C/E	1	36,8	19,2	29,6	60	0,47	C/E	3	100	82,7	4,0	40	0,07
C/E	1	100	36,2	4,4	70	0,08	C/E	3	73,4	93,5	8,9	40	0,44
C/E	1	65,2	26,6	14,5	70	0,29	C/E	3	70,5	93,2	12,4	40	0,59
C/E	1	58,9	22,3	18,8	70	0,35	C/E	3	65,2	87,9	17,7	40	0,85
C/E	1	48,5	19,6	22,0	70	0,37	C/E	3	65,2	87,6	17,5	40	0,87
C/E	1	36,8	17,8	30,0	70	0,47	C/E	3	58,9	80,7	21,7	40	1,13
C/E	1	100	49,4	3,2	90	0,08	C/E	3	36,8	70,7	28,2	40	1,17
C/E	1	65,2	30,1	13,7	90	0,29	C/E	3	0	49,9	30,0	brak	1,11
C/E	1	58,9	26,8	15,1	90	0,31	C/E	3	100	113,4	2,3	60	0,12
C/E	1	36,8	19,9	14,3	90	0,23	C/E	3	73,4	94,8	9,6	60	0,49
							C/E	3	70,5	90,0	12,3	60	0,63
C/E	2	100	68,0	4,6	40	0,41	C/E	3	65,2	68,7	17,4	60	0,83

cd. tabeli 2

C/E	2	73,4	62,2	10,5	40	0,16	C/E	3	58,9	70,4	22,6	60	1,06
C/E	2	70,5	60,1	12,4	40	0,38	C/E	3	48,5	71,6	26,8	60	1,27
C/E	2	65,2	60,9	17,6	40	0,46	C/E	3	36,8	63,0	29,9	60	1,33
C/E	2	58,9	55,9	23,0	40	0,65	C/E	3	100	120,0	2,4	70	0,18
C/E	2	48,5	64,8	26,8	40	0,76	C/E	3	73,4	83,1	10,8	70	0,59
C/E	2	36,8	54,6	29,2	40	0,91	C/E	3	70,5	77,5	12,6	70	0,62
C/E	2	0	32,94	30,0	brak	0,94	C/E	3	65,2	79,8	19,0	70	0,93
C/E	2	100	84,6	3,4	60		C/E	3	58,9	63,1	23,2	70	1,18
C/E	2	73,4	55,0	10,9	60	0,09	C/E	3	48,5	67,8	26,1	70	1,27
C/E	2	70,5	53,5	14,7	60	0,39	C/E	3	36,8	66,0	30,0	70	1,47
C/E	2	65,2	46,1	17,3	60	0,54	C/E	3	100	124,3	2,6	90	0,13
C/E	2	58,9	46,1	25,6	60	0,57	C/E	3	73,4	84,4	7,8	90	0,47
C/E	2	48,5	44,0	26,4	60	0,70	C/E	3	70,5	87,8	11,8	90	0,72
C/E	2	36,8	40,2	30,0	60	0,90	C/E	3	65,2	75,6	15,8	90	0,80
						0,96	C/E	3	36,8	53,6	13,0	90	0,84

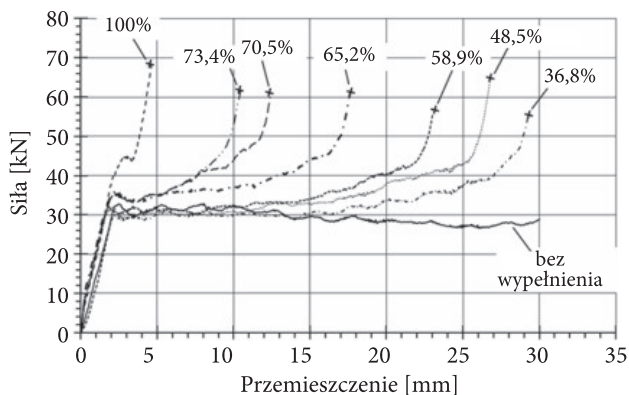
TABELA 3

Wyniki badań energochłonnych rurek S/E wypełnionych elastomerami

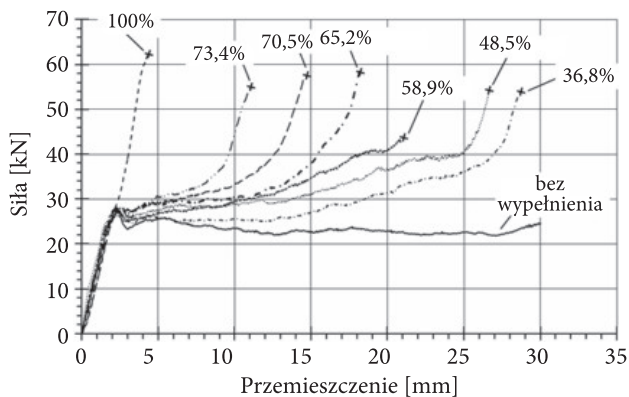
Rodzaj kompozytu	Grubość ścianki rurki	Stopień wypełnienia	Siła maksymalna	Skrócenie próbki	Twardość elastomeru	EA	Rodzaj kompozytu	Grubość ścianki rurki	Stopień wypełnienia	Siła maksymalna	Skrócenie próbki	Twardość elastomeru	EA
	[mm]	[%]	[kN]	[mm]	[°ShA]	[kJ]		[mm]	[%]	[kN]	[mm]	[°ShA]	[kJ]
S/E	2	100	62,0	4,3	40	0,12	S/E	2	100	58,9	0,14	70	0,14
S/E	2	73,4	55,0	11,1	40	0,34	S/E	2	73,4	56,0	0,50	70	0,50
S/E	2	70,5	57,1	14,6	40	0,45	S/E	2	70,5	55,5	0,47	70	0,47
S/E	2	65,2	58,3	18,2	40	0,57	S/E	2	65,2	54,3	0,60	70	0,60
S/E	2	58,9	43,4	20,8	40	0,63	S/E	2	58,9	48,6	0,69	70	0,69
S/E	2	48,5	53,9	26,6	40	0,84	S/E	2	48,5	48,0	0,85	70	0,85
S/E	2	36,8	53,8	28,7	40	0,83	S/E	2	36,8	39,7	0,84	70	0,84
S/E	2	0	27,3	30,0	brak	0,68	S/E	2	100	60,2	2,6	90	0,14
S/E	2	100	55,1	2,3	60	0,06	S/E	2	65,2	60,7	15,6	90	0,67
S/E	2	73,4	53,0	10,9	60	0,36	S/E	2	58,9	60,4	17,5	90	0,67
S/E	2	70,5	54,5	15,3	60	0,50	S/E	2	48,5	39,8	18,7	90	0,65

cd. tabeli 3

S/E	2	65,2	57,3	18,2	60	0,62	S/E	2	36,8	46,1	17,3	90	0,60
S/E	2	58,9	43,4	20,8	60	0,63							
S/E	2	48,5	53,9	26,6	60	0,84							
S/E	2	36,8	40,9	30,0	60	0,85							

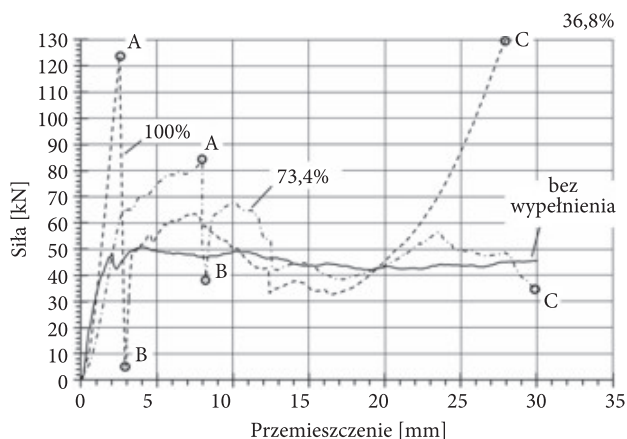


Rys. 5. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia dla kompozytów C/E wypełnionych elastomerem o twardości 40°ShA dla różnego stopnia wypełnienia. Grubość ścianek rurek 2 mm. Znak „x” — niszczenie gwałtowne rurek

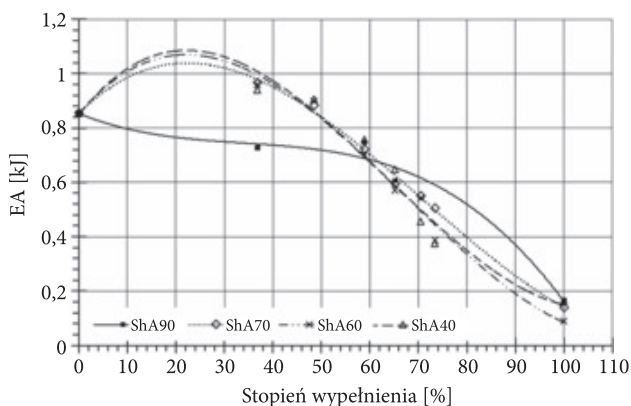


Rys. 6. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia dla kompozytów S/E wypełnionych elastomerem o twardości 40°ShA dla różnego stopnia wypełnienia. Grubość ścianek rurek 2 mm. Znak „x” — niszczenie gwałtowne rurek

Badane rurki wypełnione elastomerami wykazują mechanizm niszczenia różniący się od mechanizmu niszczenia rurek niewypełnionych. Rurki niewypełnione niszczą się przez zginanie warstw, natomiast wypełnione rurki przez pęknięcie wzdłuż pobocznic, które jest spowodowane ciśnieniem ściskającego wypełnienia (patrz rys. 4).



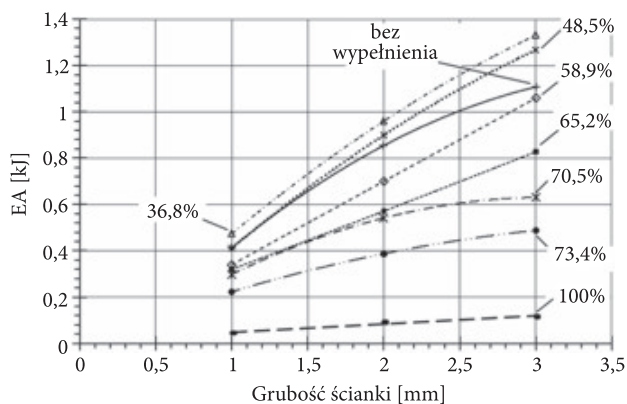
Rys. 7. Zależność siły od przemieszczenia rurek C/E, o grubości ścianki 3 mm, wypełnionych elastomerem o twardości 90° i stopniu wypełnienia 100 oraz 73,4%



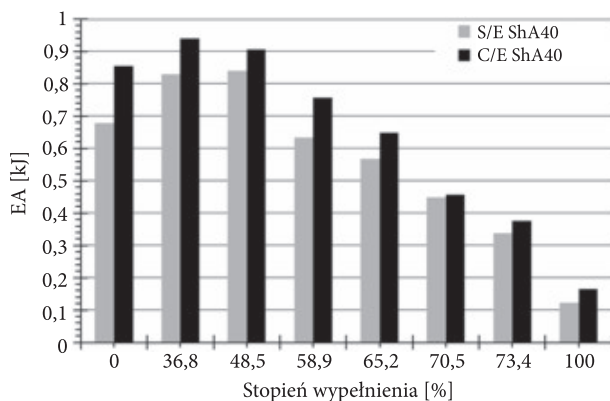
Rys. 8. Wpływ stopnia i twardości wypełnienia na EA rurek wykonanych z kompozytów C/E o grubości ścianki 2 mm

Z przedstawionych w tabelach 2 i 3 oraz na rysunkach 3-10 wyników badań można stwierdzić, że wypełnienie rurek z kompozytów C/E i S/E elastomerami o różnej twardości powoduje wzrost siły niszczącej (dla C/E średnio o 22%). Wraz ze wzrostem stopnia wypełnienia bardzo maleją przemieszczenia niszczące próbki, co bezpośrednio wpływa na spadek wartości EA (patrz rys. 5 i 6).

Rurki wypełnione elastomerami wykonane z kompozytu C/E wykazują większe EA niż analogiczne rurki wykonane z kompozytu S/E, ponieważ wytrzymałość na ściskanie kompozytu C/E jest znacznie większa. Efekt ten wykazały badania rurek C/E i S/E o równej grubości ścianki (patrz rys. 10). Natomiast na wielkość EA elastomery wypełniające rurki (o różnych twardościach: 40, 60, 70 i 90 stopni ShA) wywierały nieznaczny wpływ (patrz rys. 8).



Rys. 9. Wpływ stopnia wypełnienia rurki i jej grubości na EA dla twardości 60°ShA



Rys. 10. Porównanie EA wypełnionych rurek kompozytowych z C/E i S/E przy różnym stopniu wypełnienia elastomerami o twardości ShA 40° i grubościach ścianek rurek 2 mm

Wpływ grubości ścianki rurki kompozytów polimerowych na EA jest rosnący dla wszystkich badanych przypadków stopnia wypełnienia rurek i twardości elastomeru. Efekt ten spowodowany jest niszczeniem próbek przez zginanie warstw, a wytrzymałość na zginanie zależy od grubości w potęgze drugiej. Przedstawione na rysunku 8 punkty oznaczają wyniki doświadczalne, natomiast linie ciągłe powstały w wyniku opisanego punkty wielomianami trzeciego stopnia otrzymanymi metodą najmniejszych kwadratów. Aproksymacje zależności stopnia wypełnienia na wartość zaabsorbowanej energii wykazują, że EA rośnie do stopnia wypełnienia około 22%, natomiast powyżej 22% EA znacznie maleje. Przyczyną tego efektu są naprężenia obwodowe, wywołane przez ściskanie nieściśliwego elastomeru.

4. Wnioski

1. Wpływ rodzaju kompozytu (C/E, S/E) rurek wypełnionych na EA jest nieznaczny. Wypełnione elastomerami rurki wykonane z kompozytów C/E wykazały większe EA od rurek wykonanych z kompozytu S/E, dla tych samych stopni wypełnienia. Wpływ rodzaju kompozytu na EA jest podobny jak dla rurek niewypełnionych.
2. Wpływ grubości ścianki rurek wypełnionych na EA jest znaczny. Dla przyjętych do badań próbek o średnicy 40 mm wykonanych z kompozytu C/E i S/E średni wzrost EA wynosi 126%, przy wzroście grubości ścianki rurki od 1 do 4 mm. Wpływ grubości ścianki rurki na EA jest podobny jak w przypadku próbek niewypełnionych.
3. Wypełnienie rurek elastomerami powoduje różne efekty, w zależności od stopnia wypełnienia rurki. Wyniki badań wykazują, że EA rośnie do stopnia wypełnienia około 22%, natomiast powyżej tej wielkości znacznie maleje. Uwidocznily to przykładowe wyniki badań przedstawione na rysunku 8.
4. Wraz ze wzrostem twardości elastomeru znacznie wzrasta jego wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie (tab. 1), a także wzrastają moduły sprężystości, wzdłużny zachowawczy (E_1) i poprzeczny (G). Natomiast od twardości nieznacznie zależy współczynnik Poissona, który do obliczeń dla badanych twardości elastomeru można przyjąć $\nu = 0,5$. Wyniki badań energochłonnych wykazały, że wpływ twardości na EA jest nieznaczny (rys. 8).

Artykuł wpłynął do redakcji 18.03.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2010 r.

LITERATURA

- [1] M. PEKALAK, S. RADKOWSKI, *Gumowe elementy sprężyste*, PWN, Warszawa, 1989, 143.
- [2] *Guma. Poradnik inżyniera i technika*, praca zbiorowa, WNT, Warszawa, 1981.
- [3] S. OCHELSKI, P. BOGUSZ, A. KICZKO, *Wpływ twardości elastomerów na właściwości mechaniczne*, Journal of KONES, XI Konferencja Naukowo-Techniczna: „Programy MES we wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania”, Pisz, 2009.
- [4] P. GOTOWICKI, *Wytwarzanie próbek do badań właściwości mechanicznych z kompozytów polimerowych*, VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne”, Istebna, 2006.
- [5] Normy: PN: PN-ISO 37, PN-54/C-04253, PN-80/C-04290, PN-87/C-04289, PN-78/C-04338.

S. OCHELSKI, P. BOGUSZ

Influence of filling of composite tubes with elastomers on absorbed energy and crush mechanism

Abstract. The paper presents the results of experimental investigations of the influence of filling of the tubes with elastomers on their impact energy absorption capability. Elastomers of 40; 60; 70 and

90 hardnesses in the degrees determined by Shore's method in A scale were investigated. Composite tubes were made of epoxy resin matrix (E-53) reinforced with carbon fabric TENAX HTA (C/E) or glass fabric STR-012-350-110 (S/E) and filled with elastomers of a different filling degree level and hardness. The dimensions of the tubes subjected to the examinations were: diameter $\phi 40$ mm and length 50 mm. The degree of filling of the specimens with elastomers is determined by percentage filling of the inner volume of the tube with elastomer of different perforation size (the number and the diameter of the holes made in elastomers). The energy absorbing tests were performed on the testing machine Instron 8802. The specimens placed between two flat plates were compressed at the constant load rate equal to 40 mm/min. The maximal shortening of the specimens was equal to 30 mm. On the basis of these data, the graphs of crush force in terms of the specimen shortening were outlined (load – displacement). The influence of the degree of filling of the composite tubes and the elastomer hardness on the energy absorbing capacity was evaluated from the energy absorbing tests.

The paper covers the discussion of the crush mechanism of the specimens.

The mechanical properties of elastomers used in the tests were evaluated from axial tension and compression load as well as from changing load tests [3].

The results of the influence of filling of the composite tubes with elastomers with different filling degree and various hardness on EA value are presented in table 2. The results are average values from three tests performed for each kind of the specimen. The table contains the specimens' specification: type of composite, wall thickness, filling degree, elastomers hardness, maximum load, specimens; shortening and absorbed energy (EA). The illustrations (Figs. 3-7) present the exemplary graphs of load versus displacement dependences for various kinds of specimen specifications. The graphs 8 to 10 show dependences of filling degree, hardness, wall thickness and reinforcement type (C/E, S/E) on the energy absorbed by the given specimens (EA).

The specimens filled with elastomers show different crush mechanism than the specimens without filling. Tubes without the filling material crush progressively by layer bending mode while the specimens filled with elastomers crush by crack along the side surface of the tube, which is caused by the pressure of the compressed elastomer inside (see Fig. 4).

Filling of the C/E and G/E composite tubes with elastomers of different hardness causes the increase in crush force (at an average of 22% for C/E), what can be concluded from the investigation results presented in tables 2 and 3 as well as in Figs. 5-7. Along with the increase in a tubes' filling degree, the tube crush displacements highly decrease, what influences directly the EA value decrease (see Figs. 5 and 6).

The C/E composite tubes filled with elastomers show greater EA than the analogical tubes made of S/E composite because C/E composite compression strength is significantly greater. This effect was shown in the tests of C/E and S/E of equal wall thickness (see Fig. 10). However, the EA value was slightly influenced by the hardnesses of elastomers (40°, 60°, 70°, and 90° ShA) which filled the tubes.

The influence of the tube wall thickness of polymer composites on EA is increasing for all the examined cases of a tubes filling degree and elastomer hardness. It results from the tubes crushing by the layer bending, as the bending strength depends on the thickness in square. The points presented in Figure 8 indicate the experimental results and the solid lines arose in the result of describing the points with polynomials obtained by the minimum squares method. The approximations of the dependence degree of the filling on the absorbed energy value show that EA increases to the filling degree of about 22%, however, EA significantly decreases when it is over 22%. This effect occurs due to the circumferential stresses caused by the pressure inside the tube, which are induced by the compression of incompressible elastomers.

Keywords: polymer composites, absorbed energy, elastomers, mechanical properties, experimental mechanics