



## Wpływ wypełnienia rurek na zdolność pochłaniania energii uderzenia

WIESŁAW BARNAT, PAWEŁ BOGUSZ,  
STANISŁAW OCHELSKI

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

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki doświadczalnych badań wpływu wypełnienia próbek spienionymi tworzywami na zdolność pochłaniania energii uderzenia. Próbki w kształcie rurek wykonanych z kompozytu epoksydowego wzmocnionego tkaninami węglowymi i szklanymi, wypełniano spienionym aluminium i spienionym poli(chlorkiem winylu). Wykazano, że wypełnienie rurek zwiększa pochłanianie energii, gdy grubość ścianki rurki jest większa od 2 mm oraz energia pochłaniana rurki wypełnionej jest większa od sumy energii rurki bez wypełnienia i tworzywa spienionego. Badania wypełnionych rurek o grubości ścianek 1 mm wykazały mniejszą energię absorbowaną, ponieważ niszczyły się przy mniejszej sile aniżeli rurki bez wypełnienia.

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

**Symbole UKD:** 539.3

### 1. Wstęp

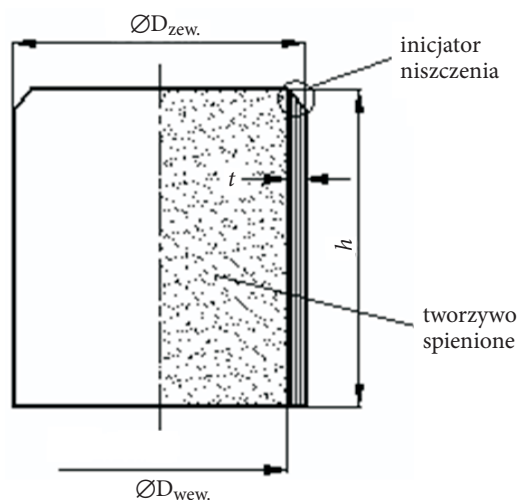
Konstrukcje energochłonne są zdolne do przejścia energii kinetycznej w czasie uderzenia, ich zdolność do absorbowania energii zależy od struktury i rodzaju materiałów zastosowanych do budowy konstrukcji. Od konstrukcji energochłonnej wymaga się, aby dobrze absorbowwała energię uderzenia ( $EA$  — energia absorbowana). Niszczenie powinno odbywać się w sposób progresywny, tak aby każda objętość konstrukcji była pokruszona, co spowoduje uzyskanie jak największej pracy niszczenia, ponieważ jest ona równoważna ujemnemu przyrostowi energii kinetycznej uderzenia. Najczęściej na konstrukcje energochłonną stosuje się kompo-

zyty polimerowe i metale oraz ich stopy. *WEA* (względna energia absorpcji) — jest to wartość całkowitej energii zaabsorbowanej przez konstrukcję energochłonną, podzielona przez masę jej zniszczonej części. Wielkość ta jest kryterium lekkości konstrukcji.

Korzystny efekt wypełnienia rurek tworzywem spienionym jest spowodowany tendencją do niszczenia stabilnego, spowodowanego brakiem lokalnego wyboczenia ścianek rurek. Zagadnienie to badali Brachos i Douglas i przedstawili je w pracy [1]. Na podstawie ich wyników można wnioskować, że suma zdolności pochłaniania energii wypełniacza piankowego i niewypełnionych rurek jest mniejsza od *EA* rurek wypełnionych tym samym wypełniaczem. Wyniki naszych badań niezupełnie potwierdziły te spostrzeżenia, ponieważ podczas ściskania rurek wypełnionych powstają w ściance rurki naprężenia obwodowe, powodujące niszczenie przy mniejszej sile ściskającej.

## 2. Przedmiot i metoda badań

Przedmiotem badań były próbki w postaci rurek wykonanych z kompozytów C/E i S/E i wypełnionych spienionym aluminium oraz spienionym PCW. Wymiary średnicy, długości i grubości ścianki rurki powinny być tak dobrane, aby podczas ściskania nie wystąpiło globalne wyboczenie. Przyjęty do badań kształt próbek przedstawiono na rysunku 1. Do wytworzenia próbek przyjęto na osnowę żywicę epoksydową E-53 i włókna szklane, w postaci tkaniny szklanej rowingowej o gramaturze  $350 \text{ g/m}^2$  marki STR-012-350-110 oraz tkaniny węglowej marki



Rys. 1. Kształt próbek zastosowanych w badaniach

TENAX HTA. Badaniom poddano próbki w postaci rurek o średnicach wewnętrznych  $\varnothing 40$  mm i  $\varnothing 20$  mm oraz długości 50 mm. Grubości ścianek rurek wynosiły: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 i 4,0 mm, w celu zbadania wpływu grubości na mechanizm niszczenia i wartość EA. Wytwarzanie próbek w kształcie rurek z kompozytu C/E i S/E metodą laminowania ręcznego opisano w pracy [2].

TABELA 1

Właściwości mechaniczne składników tworzących próbki

Lp.	Właściwości		Kompozyt C/E wzm. tkaninami	Kompozyt S/E wzm. tkaninami	Spieniony AL	Spieniony PCW
1	$E_1^+$	Moduł sprężystości wzdłużnej, rozciąganie w kierunku 1 [GPa]	46,4	19,5	1,10	0,0924
2	$E_2^+$	Moduł sprężystości wzdłużnej, rozciąganie w kierunku 2 [GPa]	46,4	19,5	1,10	0,0924
3	$E_1^-$	Moduł sprężystości wzdłużnej, ściskanie w kierunku 1 [GPa]	50,6	19,3	1,7	0,0806
4	$E_2^-$	Moduł sprężystości wzdłużnej, ściskanie w kierunku 2 [GPa]	50,6	19,3	1,7	0,0806
5	$\nu_{12}$	Współczynnik Poissona w płaszczyźnie 1-2	0,14	0,14	0,33	0,262
6	$G_{12}$	Moduł sprężystości poprzecznej w płaszczyźnie 1-2 [GPa]	2,91	2,42	0,33	0,034
7	$R_1^+$	Wytrzymałość na rozciąganie w kierunku 1 [MPa]	468,6	311,7	1,7	1,82
8	$R_2^+$	Wytrzymałość na rozciąganie w kierunku 2 [MPa]	468,6	311,7	1,7	1,82
9	$R_1^-$	Wytrzymałość na ściskanie w kierunku 1 [MPa]	375,2	306,0	1,5	0,911
10	$R_2^-$	Wytrzymałość na ściskanie w kierunku 2 [MPa]	375,2	306,0	1,5	0,911
11	$T_{12}$	Wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie 1-2 [MPa]	57,0	59,8	1,9	1,32
12	$\varepsilon_1^+$	Odształcenia niszczące, rozciąganie w kierunku 1	0,010	0,018	0,034	0,17
13	$\varepsilon_2^+$	Odształcenia niszczące, rozciąganie w kierunku 2	0,010	0,018	0,034	0,17

cd. tabeli 1

14	$\varepsilon_1^-$	Odkształcenia niszczące, ściskanie w kierunku 1	0,007	0,16	0,35	0,36
15	$\varepsilon_2^-$	Odkształcenia niszczące, ściskanie w kierunku 2	0,007	0,16	0,35	0,36
16	$\gamma_{12}$	Odkształcenia niszczące, ścinanie w płaszczyźnie 1-2	0,034	0,012	0,025-	0,22
17	$\rho$	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	1,48	1,83	0,23	0,115

gdzie: kierunek 1 — odpowiadał głównej osi ortotropii; 2 — prostopadły do kierunku 1.

Do wypełnienia rurek zastosowano dwa tworzywa: spieniony polichlorek winylu (PCW) marki PCHW-1-115 i spienione aluminium, marki ALPORAS o składzie: ~97% Al, ~1,5% Ca, ~1,5% Ti. Właściwości mechaniczne składników próbek przedstawiono w tabeli 1. Dla obydwu średnic wykonano po trzy grupy próbek. W rurki pierwszej grupy wklejono, za pomocą żywicy epoksydowej, próbki walcowe ze spienionego aluminium, o średnicy równej średnicy wewnętrznej danej próbki. W drugiej grupie rurek wklejono w ten sam sposób walce ze spienionego polichloroku winylu. Trzecią grupę tworzyły rurki kompozytowe bez wypełnienia.

Próby energochłonne przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 8802. Próbki umieszczono pomiędzy dwiema płaskimi płytami i ścisniano je przy stałej prędkości obciążenia wynoszącej 40 mm/min. Maszyna rejestrowała przemieszczenie głowicy ścisnącej ( $\Delta l$ ) oraz siłę niszczącą ( $P_{nisz}$ ). Maksymalne skrócenie próbek wynosiło 30 mm. Na podstawie tych danych zostały sporządzone wykresy siły niszczącej w funkcji skrócenia próbki, które przykładowo przedstawiono na rysunkach 2-5.

Energia absorpcji ( $EA$ ) została obliczona poprzez numeryczne całkowanie pola pod wykresem siła ( $P$ ) — przemieszczenie ( $\Delta l$ ). Krok całkowania (długość przedziału  $\Delta l$ ) był stały i wynikał z częstotliwości próbkowania wyników. Liczba przedziałów  $n$  wynosiła dla każdego wykresu 2251. Obliczenia  $EA$  wykonano ze wzoru:

$$EA = \int_0^l P dl = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i + P_{i+1})}{2} \Delta l. \quad (1)$$

Względną energię absorbowaną ( $WEA$ ) wyznaczono, dzieląc  $EA$  przez masę zniszczonej części próbki.

### 3. Wyniki badań doświadczalnych

Wyniki badań próbek o tej samej grubości ścianki i tej samej grupy zostały uśrednione (obliczano średnią algebraiczną z trzech prób), które przedstawiono w tabeli 2 i na rysunkach 2-17. Na rysunkach 2-4 dodatkowo przedstawiono zdjęcia stopniowego niszczenia próbek.

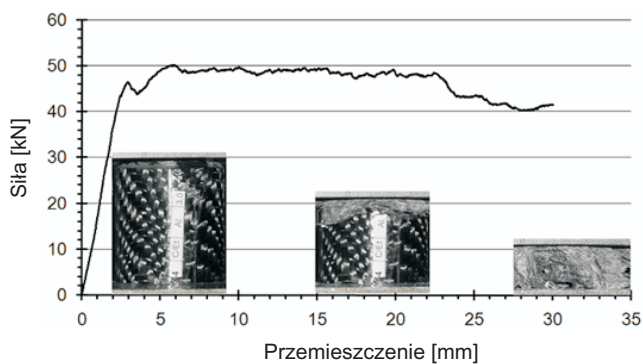
TABELA 2

Wyniki badań rurek o średnicy 20 mm i 40 mm wykonanych z kompozytu S/E oraz C/E, w różnej konfiguracji i grubości oraz wypełnienia

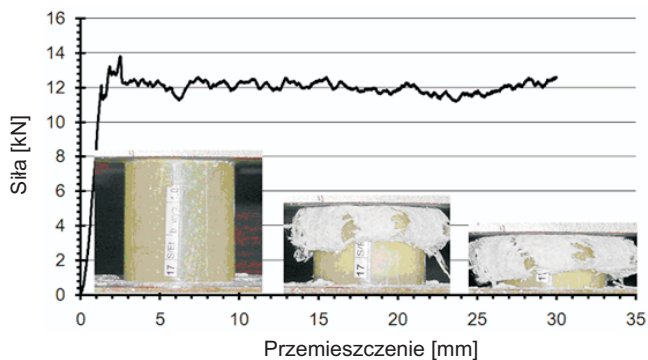
Lp.	Rodzaj tworzywa rurki	Rodzaj tworzywa spienionego	Średnica wewn. rurki	Grubość ścianki rurki	Masa rurki	Masa całkowita próbki	EA	WEA
			[mm]	[mm]	[g]	[g]		
1	S/E	brak	20,0	1,5	7,9	7,9	0,24	50,8
2	S/E	brak	20,0	2,5	11,8	11,8	0,39	54,8
3	S/E	brak	20,0	3,0	15,7	15,7	0,55	58,2
4	S/E	Al	20,0	1,5	8,2	13,0	0,31	40,2
5	S/E	Al	20,0	2,5	11,6	15,8	0,48	50,8
6	S/E	Al	20,0	3,0	15,4	19,7	0,68	57,7
7	S/E	PCW	20,0	1,5	8,6	10,8	0,34	51,8
8	S/E	PCW	20,0	2,5	12,3	14,3	0,51	60,0
9	S/E	PCW	20,0	3,0	15,8	18,0	0,68	62,5
10	S/E	brak	40,0	1,0	12,7	12,7	0,35	46,3
11	S/E	brak	40,0	2,0	18,8	18,8	0,53	47,2
12	S/E	brak	40,0	3,0	32,1	32,1	0,97	50,1
13	S/E	Al	40,0	1,0	12,6	28,7	0,44	25,3
14	S/E	Al	40,0	2,0	19,4	38,9	0,75	32,0
15	S/E	Al	40,0	3,0	32,7	47,9	1,36	47,2
16	S/E	PCW	40,0	1,0	12,7	20,4	0,42	34,6
17	S/E	PCW	40,0	2,0	19,4	26,8	0,77	47,6
18	S/E	PCW	40,0	3,0	32,5	39,8	1,34	56,3
19	C/E	brak	20,0	1,0	4,3	4,3	0,22	82,9
20	C/E	brak	20,0	2,0	8,0	8,0	0,39	82,4
21	C/E	brak	20,0	3,0	13,2	13,2	0,67	84,2
22	C/E	Al	20,0	1,0	4,5	8,7	0,23	43,8
23	C/E	Al	20,0	2,0	9,0	13,3	0,47	59,6

cd. tabeli 2

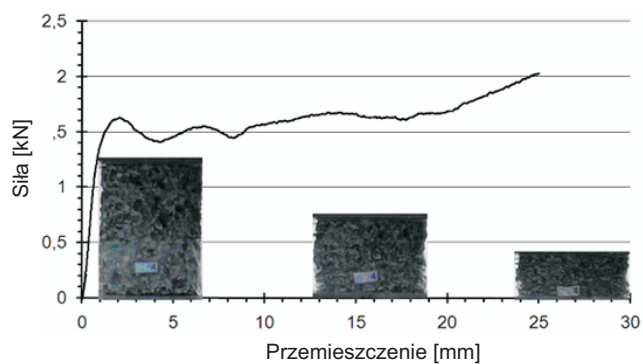
24	C/E	Al	20,0	3,0	12,9	17,0	0,78	76,8
25	C/E	PCW	20,0	1,0	4,1	8,2	0,22	44,4
26	C/E	PCW	20,0	2,0	8,2	10,3	0,48	76,7
27	C/E	PCW	20,0	3,0	12,3	14,3	0,77	90,0
28	C/E	brak	40,0	2,0	19,5	19,5	0,81	69,2
29	C/E	brak	40,0	3,0	21,2	21,2	0,94	73,9
30	C/E	brak	40,0	4,0	32,1	32,1	1,55	80,5
31	C/E	Al	40,0	2,0	17,9	35,8	0,89	41,2
32	C/E	Al	40,0	3,0	22,6	38,3	1,30	56,6
33	C/E	Al	40,0	4,0	33,5	48,25	1,90	65,6
34	C/E	PCW	40,0	2,0	18,0	25,6	0,87	56,6
35	C/E	PCW	40,0	3,0	21,9	30,0	1,25	69,5
36	C/E	PCW	40,0	4,0	33,5	41,3	1,87	75,4
37	Spienione Al		20,0	–	–	4,3	0,015	6,9
38	Spienione Al		40,0	–	–	13,7	0,041	5,5
39	Spienione PCW		20,0	–	–	1,8	0,011	9,6
40	Spienione PCW		40,0	–	–	6,75	0,046	11,3



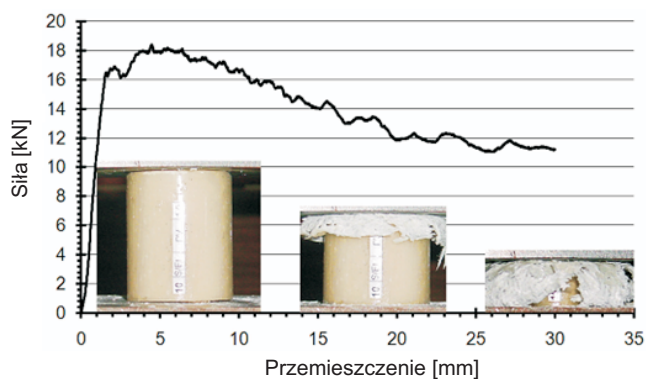
Rys. 2. Zależność  $P_{nisz}-\Delta l$  próbki C/E o średnicy  $\varnothing 40$  mm i grubość ścianki 3,0 mm, wypełniona spienionym Al



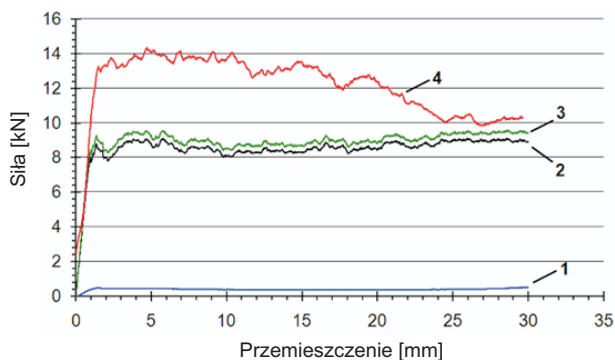
Rys. 3. Zależność  $P_{nisz} - \Delta l$  próbki S/E bez wypełnienia o średnicy  $\varnothing 40$  mm i grubość ścianki 1,0 mm



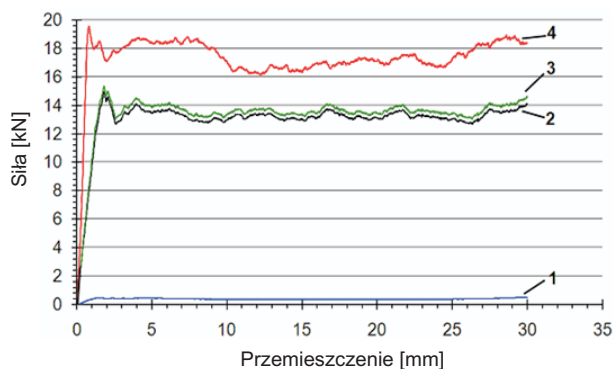
Rys. 4. Zależność  $P_{nisz} - \Delta l$  spienionego Al w kształcie walca o średnicy  $\varnothing 40$  mm



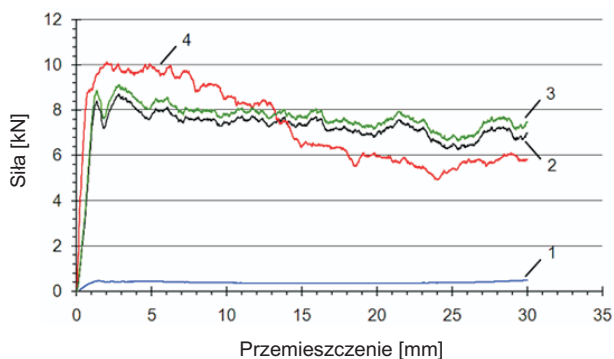
Rys. 5. Zależność  $P_{nisz} - \Delta l$  próbki S/E o średnicy  $\varnothing 40$  mm i grubość ścianki 1,0 mm, wypełniona spienionym PCW



Rys. 6. Zależność  $P_{nisz}-\Delta l$  próbki S/E o średnicy  $\varnothing 20$  mm i grubość ścianki 1,5 mm: 1) spieniony polichlorek winylu (PCW); 2) próbka S/E bez wypełnienia; 3) suma algebraiczna rzędnych z wykresów 1 i 2; 4) próbka S/E wypełniona spienionym PCW

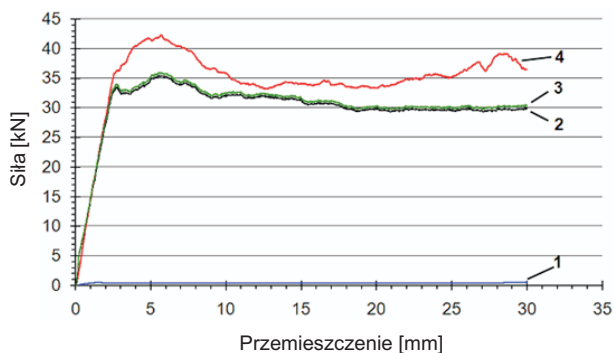


Rys. 7. Zależność  $P_{nisz}-\Delta l$  próbki S/E o średnicy  $\varnothing 20$  mm i grubość ścianki 2,5 mm: 1) spienione PCW; 2) próbka S/E bez wypełnienia; 3) suma algebraiczna rzędnych z wykresów 1 i 2; 4) próbka S/E wypełniona spienionym PCW

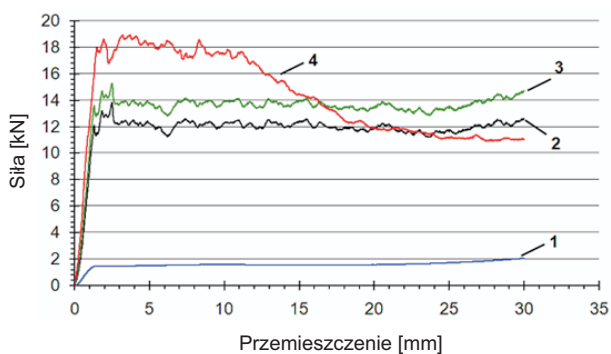


Rys. 8. Zależność  $P_{nisz}-\Delta l$  próbki C/E o średnicy  $\varnothing 20$  mm i grubość ścianki 1,0 mm: 1) spienione PCW; 2) próbka C/E bez wypełnienia; 3) suma algebraiczna rzędnych z wykresów 1 i 2; 4) próbka C/E wypełniona spienionym PCW

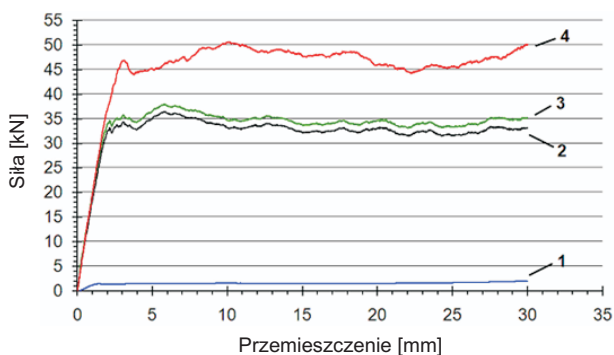




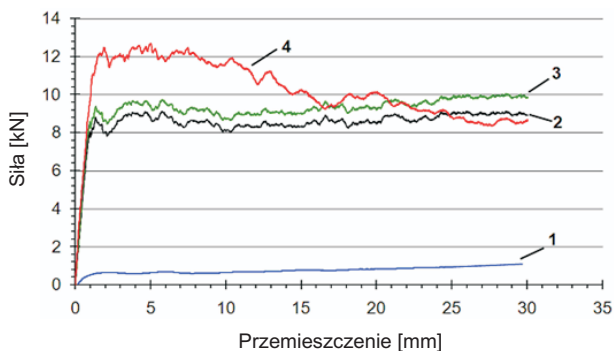
Rys. 9. Zależność  $P_{nisz}-\Delta l$  próbki C/E o średnicy  $\varnothing 20$  mm i grubość ścianki 4,0 mm: 1) spienione PCW; 2) próbka C/E bez wypełnienia; 3) suma algebraiczna rzędnych z wykresów 1 i 2; 4) próbka C/E wypełniona spienionym PCW



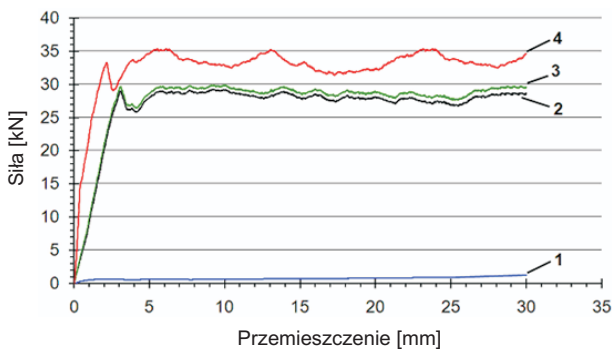
Rys. 10. Zależność  $P_{nisz}-\Delta l$  próbki S/E o średnicy  $\varnothing 40$  mm i grubość ścianki 1,0 mm: 1) spienione PCW; 2) próbka S/E bez wypełnienia; 3) suma algebraiczna rzędnych z wykresów 1 i 2; 4) próbka S/E wypełniona spienionym PCW



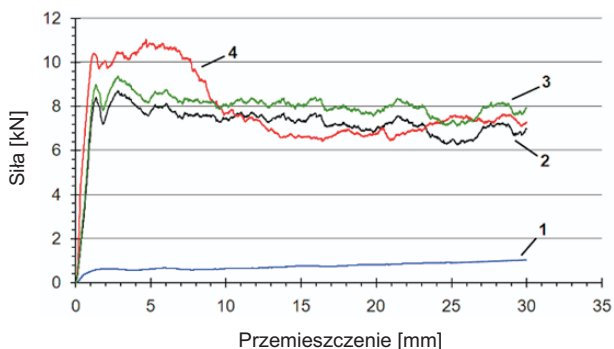
Rys. 11. Zależność  $P_{nisz}-\Delta l$  próbki S/E o średnicy  $\varnothing 40$  mm i grubość ścianki 3,0 mm: 1) spienione PCW; 2) próbka S/E bez wypełnienia; 3) suma algebraiczna rzędnych z wykresów 1 i 2; 4) próbka S/E wypełniona spienionym PCW



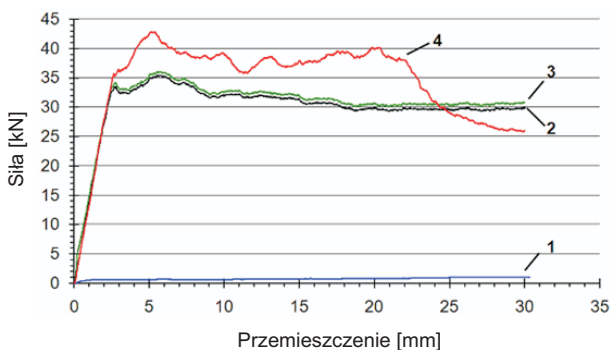
Rys. 12. Zależność  $P_{nisz}$ - $\Delta l$  próbki S/E o średnicy  $\varnothing 20$  mm i grubości ścianki 1,5 mm: 1) spienione Al; 2) próbka S/E bez wypełnienia; 3) suma algebraiczna rzędnych z wykresów 1 i 2; 4) próbka S/E wypełniona spienionym Al



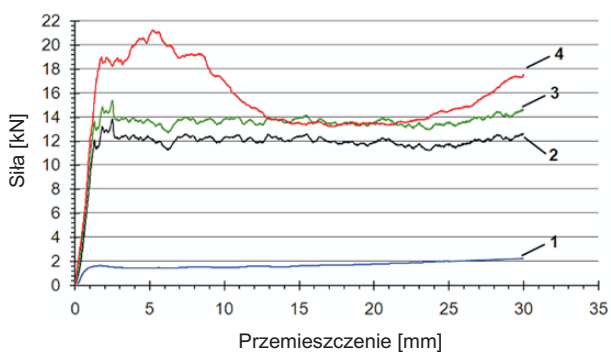
Rys. 13. Zależność  $P_{nisz}$ - $\Delta l$  próbki S/E o średnicy  $\varnothing 20$  mm i grubości ścianki 4,0 mm: 1) spienione Al; 2) próbka S/E bez wypełnienia; 3) suma algebraiczna rzędnych z wykresów 1 i 2; 4) próbka S/E wypełniona spienionym Al



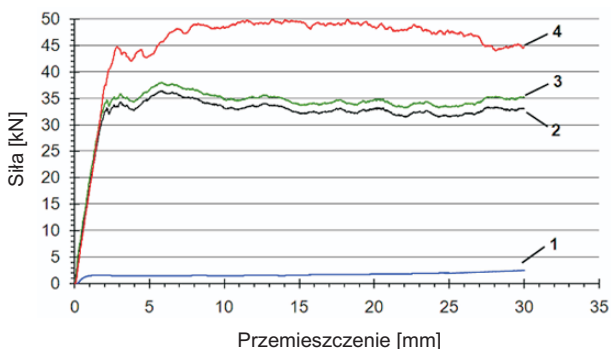
Rys. 14. Zależność  $P_{nisz}$ - $\Delta l$  próbki C/E o średnicy  $\varnothing 20$  mm i grubości ścianki 1,0 mm: 1) spienione Al; 2) próbka C/E bez wypełnienia; 3) suma algebraiczna rzędnych z wykresów 1 i 2; 4) próbka C/E wypełniona spienionym Al



Rys. 15. Zależność  $P_{nisz}-\Delta l$  próbki C/E o średnicy  $\varnothing 20$  mm i grubości ścianki 4,0 mm: 1) spienione Al; 2) próbka C/E bez wypełnienia; 3) suma algebraiczna rzędnych z wykresów 1 i 2; 4) próbka C/E wypełniona spienionym Al



Rys. 16. Zależność  $P_{nisz}-\Delta l$  próbki S/E o średnicy  $\varnothing 40$  mm i grubości ścianki 1,0 mm: 1) spienione Al; 2) próbka S/E bez wypełnienia; 3) suma algebraiczna rzędnych z wykresów 1 i 2; 4) próbka S/E wypełniona spienionym Al



Rys. 17. Zależność  $P_{nisz}-\Delta l$  próbki S/E o średnicy  $\varnothing 40$  mm i grubości ścianki 3,0 mm: 1) spienione Al; 2) próbka S/E bez wypełnienia; 3) suma algebraiczna rzędnych z wykresów 1 i 2; 4) próbka S/E wypełniona spienionym Al

Na podstawie doświadczalnych wyników badań można wnioskować o dwóch mechanizmach niszczenia próbek. Pierwszy występuje przy małej grubości ścianki ( $t \leq 1$  mm), drugi przy  $t > 2$  mm. Podczas ściskania rurek wypełnionych tworzywami spienionymi następuje ich spęczanie, wytwarzające parcie na wewnętrzną powierzchnię rurek. W wyniku tego powstają na powierzchni zewnętrznej rurki naprężenia obwodowe, które mają większy wpływ na niszczenie rurki aniżeli naprężenia od siły ściskającej i przyczyniają się do przedwczesnego niszczenia próbek. Potwierdzają to spadki siły niszczącej w zależnościach  $P_{nisz} - \Delta l$ , przedstawionych na rysunkach 6 i 8, natomiast nie ma spadku siły dla rurki niewypełnionej o grubości 1 mm, co przedstawiono na rysunku 3.

Dla grubości ścianek rurek powyżej 2 mm, wypełnienie rurek powoduje znaczne zwiększenie  $EA$ , które jest większe od sumy  $EA$  tworzywa spienionego i rurki bez wypełnienia. Efekt ten widoczny jest na rysunkach 7, 9, 11, 13, 17. Wypełnienie rurek wykonanych z kompozytu S/E powoduje większy przyrost  $EA$ , aniżeli wykonane z C/E, co spowodowane jest większymi odkształceniami niszczącymi kompozytów epoksydowych wzmocnionych włóknami szklanymi, pomimo że wytrzymałość na rozciąganie kompozytu C/E (naprężenia obwodowe) jest większa od wytrzymałości kompozytu S/E.

Wyniki wpływu wypełnienia tworzywami spienionymi rurek na wartość  $EA$ , przykładowo przedstawiono w tabeli 3, dla rurek o średnicy 40 mm i grubości ścianek 1 i 3 mm, wykonanych z kompozytów C/E i S/E.

TABELA 3

Wyniki obliczeń wpływu wypełnienia na  $EA$ 

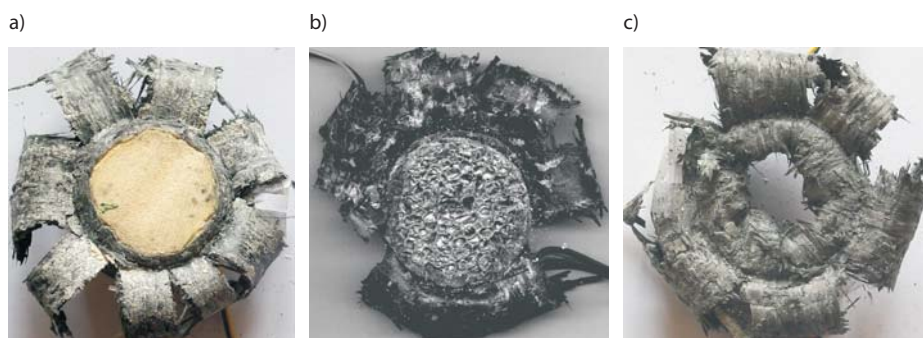
Lp.	Rodzaj tworzywa rurki	Rodzaj tworzywa spienionego	Grubość ścianki rurki [mm]	Wzrost $EA$ w [%] ( $EA_{wyp}/EA_{bez\ wyp}$ )
1	C/E	Al	1,0	-6,8
2	C/E	PCW	1,0	6,8
3	C/E	Al	3,0	38,3
4	C/E	PCW	3,0	33,0
5	S/E	Al	1,0	25,7
6	S/E	PCW	1,0	20,0
7	S/E	Al	3,0	40,2
8	S/E	PCW	3,0	38,0

$EA_{wyp}$  — energia absorbowana dla rurki wypełnionej tworzywem spienionym;

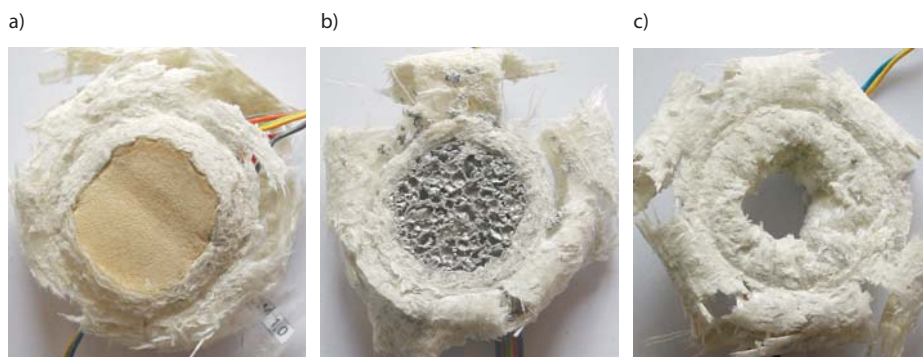
$EA_{bez\ wyp}$  — energia absorbowana dla rurki bez wypełnienia.

Z wyników doświadczalnych zestawionych w tabeli 2 określono wpływ rodzaju spienionego tworzywa wypełniającego rurkę (spienione Al lub PCW) na zdolność pochłaniania energii. Dla wszystkich średnic i grubości ścianki próbek przyjętych do badań oraz rodzaju kompozytu (C/E i S/E), wpływ ten okazał się nieduży i był większy dla spienionego Al — w granicach od 0 do 5%. Tworzywo spienione Al ma większe moduły sprężystości, a więc i większą sztywność od spienionego PCW, co powoduje mniejsze parcie na powierzchnie wewnętrzną rurki i mniejsze naprężenia obwodowe.

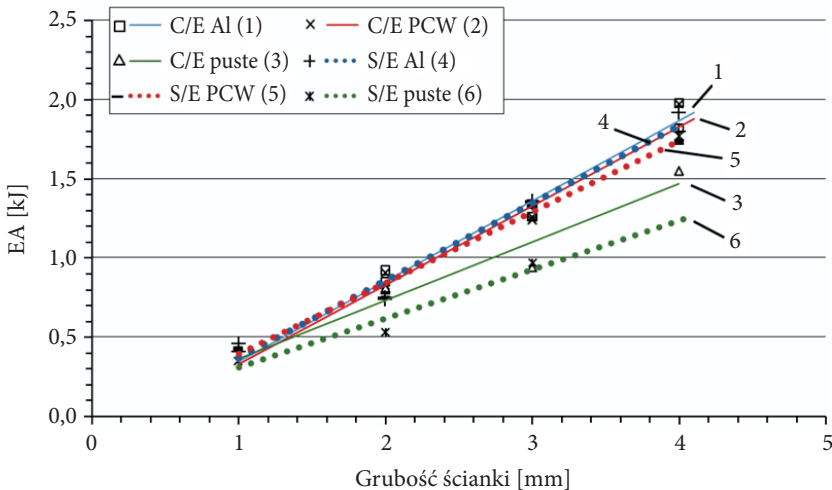
Wszystkie badane próbki niszczyły się metodą zginania warstw. Ten rodzaj niszczenia polega na tym, że ścianka próbki pod wpływem obciążenia rozdziela się na dwie części. Część zewnętrzna zagina się na zewnątrz rurki. Druga część zagina się do wewnątrz próbki. Próbki bez wypełnienia niszczyły się przez zginanie warstw do wewnątrz i na zewnątrz rurki, natomiast wszystkie badane próbki wypełnione spienionymi tworzywami, niszczyły się przez zginanie ścianki rurki tylko na zewnątrz rurki. Zdjęcia zniszczonych próbek przedstawiono na rysunkach 18 i 19.



Rys. 18. Zdjęcia zniszczonych próbek C/E o grubości ścianki 1,0 mm: a) wypełnionej spienionym PCW; b) wypełnionej spienionym Al; c) bez wypełnienia



Rys. 19. Zdjęcia zniszczonych próbek S/E o grubości ścianki 1,0 mm: a) wypełnionej spienionym PCW; b) wypełnionej spienionym Al; c) bez wypełnienia



Rys. 20. Zależność  $EA$  od grubości ścianki rurek i średnicy 40 mm, dla różnych wariantów wypełnienia rurek C/E i S/E

Ponieważ badane rurki, wypełnione spienionymi tworzywami i niewypełnione, mogą być wykorzystane jako elementy konstrukcji energochłonnej, na rysunku 20 przedstawiono wyniki badań w postaci zależności  $WEA$  od grubości ścianki rurki dla badanych próbek.

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wyników doświadczalnych badań można wnioskować, że:

1. W badaniach energochłonnych wypełnienie rurek tworzywami spienionymi zwiększa  $EA$ , gdy grubość ścianki rurki jest większa od około 1 mm, wówczas dodatkowe obciążenie rurki wytworzone parciem tworzywa spienionego jest przejmowane przez zwiększony przekrój rurki. Natomiast rurki o grubości mniejszej od 1 mm niszczą się przez dodatkowe naprężenia obwodowe.
2. Próbkę z rurkami z kompozytu C/E są bardziej wrażliwe na dodatkowe naprężenia obwodowe pochodzące od parcia tworzywa spienionego, ponieważ mają znacznie mniejsze odkształcenia niszczące od kompozytów epoksydowych wzmocnionych włóknami szklanymi.
3. Pomimo znacznie różnych właściwości mechanicznych spienionych tworzyw (spienionego Al i PCW), którymi wypełniono rurki, wpływ rodzaju wypełniacza na  $EA$  jest nieznaczny. Wypełnione rurki spienionym Al wykazały większą  $EA$  o 13,5% od  $EA$  rurek wypełnionych PCW.

4. Wpływ rodzaju kompozytu (C/E, S/E) rurek wypełnionych na *EA* jest nieznaczny. Badane rurki wykonane z kompozytu S/E wykazały większą *EA* o 10,3% od próbek wykonanych z kompozytu C/E. Natomiast badane rurki o  $\varnothing 40$  mm bez wypełnienia wykazały większe *EA* od rurek wykonanych z S/E.
5. Wpływ grubości ścianki rurek wypełnionych na *EA* jest duży. Dla przyjętych do badań próbek o średnicy 40 mm wykonanych z kompozytu C/E i S/E oraz wypełnionych spienionym Al lub PCW średni wzrost *EA* jest pięciokrotny, przy wzroście grubości ścianki rurki od 1 mm do 4 mm.
6. Wpływ wypełnienia rurek spienionymi tworzywami jest znaczny, średni wzrost *EA* dla rurek o grubości ścianki większej od 2 mm i średnicy 20 mm wynosi 27%, a dla średnicy 40 mm był większy i wynosi 37%. Natomiast wpływ wypełnienia powoduje zwiększenie masy próbki, która jest przyczyną zmniejszenia na *WEA* próbek wypełnionych.

Artykuł wpłynął do redakcji 31.12.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2009 r.

#### LITERATURA

- [1] V. BRACHOS, C. D. DOUGLAS, *Energy Absorption Characteristics of Hybrid Composite Structures*, Proceedings of the 27th International SAMPE Technical Conference, 1995, 421-435.
- [2] P. GOTOWICKI, *Wytwarzanie próbek do badań właściwości mechanicznych z kompozytów polimerowych*, VII Konferencja Naukowo-Techniczna Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne, Istebna, 2006.

W. BARNAT, P. BOGUSZ, S. OCHELSKI

#### **Influence of tubes filling on capability of impact energy absorption**

**Abstract.** This paper presents the experimental investigations of the impact energy absorption capability of the composite tubes filled with different foamed materials. Inside the tube specimens made of epoxy resin reinforced with carbon and glass fabric, aluminum foam or PVC foam cylinders were glued. It was proved that the foamed material filling increases the impact energy absorption for composite specimens with wall thickness greater than 2 mm. The value of the absorbed energy is greater than the algebraic sum of the energy absorbed by the same specimen without filling and the energy absorbed by the foamed material cylinder. It was shown that the filled specimens with a thickness of 1 mm absorbed less impact energy than the specimens without filling, because the mean crush load was clearly lower.

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

**Universal Decimal Classification:** 539.3

