

## CRUSH ENERGY ABSORPTION CAPABILITY OF CARBON-EPOXY AND GLASS-EPOXY COMPOSITES

Stanislaw Ochelski, Pawel Gotowicki

Military Academy of Technology, Faculty of Mechanical Engineering  
Sylwestra Kaliskiego Street 2, 00-908 Warsaw, Poland  
tel. +48 22 683 95 48, fax: +48 22 683 71 52  
e-mail: sochelski@wme.wat.edu.pl

### Abstract

In the paper, experimental investigation of the energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites was described. Influence of the following factors on the energy absorption capability was analysed: fibre reinforcement type, kind of structure, geometry and shape of specimens, orientation of fibres in a layer and stacking sequence of layers. Specimens in a shape of tubes and truncated cones were selected for testing. The basic mechanical properties of composites designed for elements of energy absorbing structure, essential for numerical simulation of the failure mechanism during the crash test, were determined experimentally. The favourable effect of the failure initiator, made at the specimen's edge, causing the increase in the specific absorbed energy (SAE), as well as the influence of the thickness of individual layers of the layered composite on the SAE value were also investigated. In the tests for truncated cone specimens, the influences of the specimen's thickness on the SAE value were analysed.

**Keywords:** polymer composites, absorption energy, experimental testing, transport, carbon fiber

## ZDOLNOŚĆ POCHŁANIANIA ENERGII UDERZENIA ELEMENTÓW Z KOMPOZYTÓW WĘGIEL/EPOKSYD I SZKŁO/EPOKSYD

### Streszczenie

W pracy opisano doświadczalne badania zdolności pochłaniania energii przez kompozyty węglowo-epoksydowe i szklano-epoksydowe, których porównano wyniki badań. Na wartość pochłaniania energii przeanalizowano wpływ, takich czynników jak: rodzaj włókien wzmacniających, rodzaj struktury, geometria i kształty próbek, orientacja włókien w warstwie i sekwencja układania warstw. Przyjęto do badań próbki w postaci rurek i ściętych stożków. Doświadczalnie określono podstawowe właściwości mechaniczne kompozytów, przeznaczonych na elementy konstrukcji energochłonnej, które są niezbędne do numerycznej symulacji mechanizmu niszczenia, występującego podczas badań zdolności pochłaniania energii w czasie uderzenia. Badano też korzystny wpływ inicjatora niszczenia, wykonanego na krawędzi próbki, który powoduje zwiększenie wartości względnej energii absorbowanej (WEA). Zbadano wpływ grubości poszczególnych warstw kompozytu warstwowego na wartość WEA. W badaniach próbek w postaci ściętych stożków, analizowano wpływ grubości ścianki i połówkowego kąta stożka na wartość WEA.

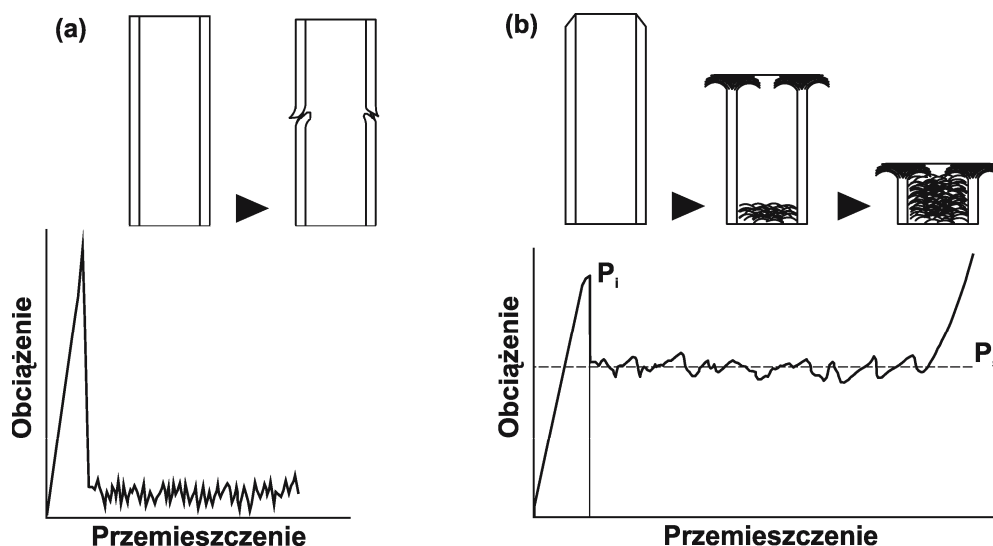
**Słowa kluczowe:** kompozyty polimerowe, energia absorpcji, badania doświadczalne, transport, włókna węglowe

### 1. Wprowadzenie

Konstrukcje energochłonne są zdolne do przejścia energii kinetycznej w czasie uderzenia, której ujemny przyrost jest równoważny pracy niszczenia (kruszenia, łamania) konstrukcji. Obecnie, konstrukcje energochłonne mają szerokie zastosowanie, między innymi, w przemyśle lotniczym (minimalizują skutki lądowań awaryjnych), w konstrukcji pojemników przeznaczonych do zrzutu z samolotu, w systemach ochrony przed skutkami eksplozji ładunków wybuchowych, w przemyśle samochodowym (w szczególności samochody wyścigowe), w kolejnictwie oraz stosowane są między innymi na zbiorniki przewożące paliwa lub środki żrące. W lotnictwie do budowy konstrukcji energochłonnych, ze względu na wymaganą lekkość konstrukcji,

wykorzystuje się kompozyty polimerowe, różnych rodzajów i postaci wzmocnienia. Kompozyty polimerowe mają nie tylko największy stosunek wytrzymałości i sztywności do masy właściwej ( $R/\rho$ ,  $E/\rho$ ), ale także największą względną energię absorpcji (WEA, energię absorpcji odniesioną do masy), w porównaniu do metali i ich stopów.

Aby konstrukcje energochłonne jak najlepiej absorbowwały energię uderzenia, niszczenie ich nie może odbywać się w sposób gwałtowny, jak w przypadku niszczenia belki podczas globalnego wyboczenia, natomiast niszczenie powinno odbywać się w sposób progresywny tak, aby każda objętość próbki była zniszczona (pokruszona) na najmniejsze cząsteczki - rys.1.



Rys. 1. Sposoby niszczenia a) niszczenie katastroficzne (gwałtowne), b) niszczenie progresywne  
Fig. 1. Crush mechanism a) catastrophic failure, b) progressive failure

Proces progresywnego niszczenia, głównie zależy od właściwości mechanicznych włókien, rodzaju struktur wzmocnienia, orientacji włókien w warstwie, sekwencji ułożenia warstw, zawartości włókien w kompozycie i kształtu oraz geometrii próbek.

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. Ponieważ elementy cienkościenne są narażone na wyboczenie i gwałtowne niszczenie, można temu zapobiec podpierając ściankę elementu cienkościennego w miejscu potencjalnego wyboczenia. 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.

## 2. Przedmiot 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  $350 \text{ g/m}^2$ , pasmami rowingu marki ES-10-400-0-60 i matą szklaną o gramaturze  $316 \text{ g/m}^2$  oraz włóknami węglowymi w postaci: tkaniny rowingowej marki TENAX HTA 5131 i pasmami węglowego rowingu marki TENAX HTS 5631.

Właściwości mechaniczne kompozytów określono w badaniach doświadczalnych, które przeprowadzono zgodnie z normami; PN-EN ISO 527-1:1998, PN-EN ISO 527-2:1998, ASTM-3039-76, ISO 8515:91, ISO 3597-3:93, ASTM D 3410-75, ISO 14129:1997 oraz wytycznymi zawartymi w pracy [2]. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1a i 1b.

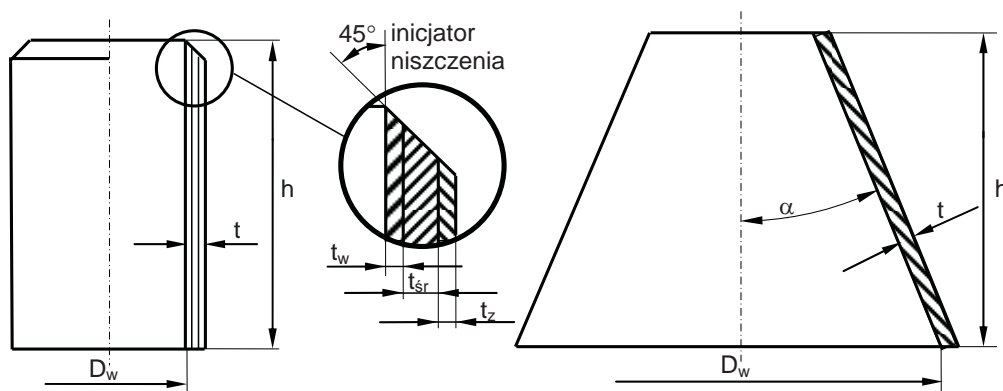
Do badań zdolności pochłaniania energii uderzenia przyjęto próbki, które miały kształt rurek o średnicy wewnętrznej  $D_w = 49,3 \text{ mm}$ , oraz ściętych stożków o połówkowym kącie

wierzchołkowym równym  $\alpha = 5, 10, 15$  i  $20^\circ$  o grubości ścianki z zakresu  $t = 1,2 \div 9$  mm - rys.2. Próbkę w kształcie rurek, na jednej krawędzi mają wykonane ścieęcia pod kątem  $45^\circ$ , spełniające rolę inicjatora niszczenia, które powodują znaczne zmniejszenie  $P_{\max}$  i zapewniają proces progresywnego niszczenia. Próbkę w postaci ściętych stożków nie wymagają wykonania inicjatora w postaci ścieęcia krawędzi, ponieważ początek niszczenia rozpoczyna się od mniejszej średnicy stożka, w której występują największe naprężenia. Otrzymane wyniki badań próbek w kształcie rurek, wykonanych z kompozytu epoksydowego wzmocnionego włóknami szklanymi, z inicjatorem i bez inicjatora wykazują, że wartość WEA próbek z inicjatorem była większa o 21% w porównaniu z wynikami próbek bez inicjatora. Otrzymane z badań różne WEA należy tłumaczyć dużym  $P_{\max}$ , na wykresie  $P_{\text{niszcz.}} - \Delta l$ , w przypadku badania próbki bez inicjatora, która powoduje wstępne niszczenie całej objętości próbki, w wyniku czego podczas dalszej próby siła niszcząca jest mniejsza, a więc i mniejsza WEA.

Na podstawie danych z literatury i wyników badań własnych, przyjęto do badań następujące struktury 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 prostopadłe 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 wzmocnionych matą szklaną.

### 3. Metoda badań

Badania doświadczalne były przeprowadzone na standardowej maszynie wytrzymałościowej ISTRON 8802, w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  i wilgotności 55%. Badania prowadzono przy prędkości obciążenia (prędkości trawersy maszyny) równej 0,66 mm/s. Zależności siły niszczącej od odkształcenia (skrócenia próbki) otrzymane podczas badań i inne wartości mierzone, były zapisywane automatycznie w komputerze. Ponadto, w tabelach podane są charakterystyczne wymiary próbek, przedstawionych na rysunku 2.



Rys. 2. Kształty próbek zastosowanych w badaniach  
Fig. 2. Shapes of specimens used in tests

### 4. Wyniki badań

Wyniki badań właściwości mechanicznych kompozytów epoksydowych wzmocnionych włóknami węglowymi i szklanymi, przedstawiono w tabeli 1a i 1b, a oznaczenia przyjętych kierunków kompozytu monotropowego i ortotropowego przedstawiono na rys.3. Określone właściwości mechaniczne są niezbędne do numerycznej symulacji niszczenia progresywnego kompozytu.

Tab. 1a. Właściwości mechaniczne epoksydowych kompozytów monotropowych wzmocnionych włóknami szklanymi i węglowymi

Tab. 1a. Mechanical properties of monotropic epoxy composites reinforced with glass and carbon fibres

L.p.	Wielkości określone w badaniach		Kompozyt węgiel/epoksyd	Kompozyt szkło/epoksyd	Jednostka
1	$E_1^+$	Moduł sprężystości wzdłużnej, rozciąganie w kierunku 1	91,04	35,21	[GPa]
2	$E_1^-$	Moduł sprężystości wzdłużnej, ściskanie w kierunku 1	88,9	41,1	[GPa]
3	$\nu_{12}$	Współczynnik Poissona w płaszczyźnie 1-2	0,27	0,311	[-]
4	$G_{12}$	Moduł sprężystości poprzecznej w płaszczyźnie 1-2	3,6	2,27	[GPa]
5	$R_1^+$	Wytrzymałość na rozciąganie w kierunku 1	1004,9	665,1	[MPa]
6	$R_1^-$	Wytrzymałość na ściskanie w kierunku 1	578,7	412	[MPa]
7	$T_{12}$	Wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie 1-2	39,1	61,1	[MPa]
8	$\varepsilon_1^+$	Odształcenia niszczące, rozciąganie w kierunku 1	0,011	0,02	[-]
9	$\varepsilon_1^-$	Odształcenia niszczące, ściskanie w kierunku 1	0,0065	0,011	[-]
10	$\gamma_{12}$	Odształcenia niszczące, ścinanie w płaszczyźnie 1-2	0,027	0,035	[-]

Tab. 1b. Właściwości mechaniczne ortotropowych kompozytów epoksydowych wzmocnionych tkaninami szklanymi i węglowymi

Tab. 1b. Mechanical properties of orthotropic epoxy composites reinforced with glass and carbon fibres

L.p.	Wielkości określone w badaniach		Kompozyt węgiel/epoksyd	Kompozyt szkło/epoksyd	Jednostka
1	$E_1^+$	Moduł sprężystości wzdłużnej, rozciąganie w kierunku 1	46,4	19,54	[GPa]
2	$E_1^-$	Moduł sprężystości wzdłużnej, ściskanie w kierunku 1	50,6	19,33	[GPa]
3	$\nu_{12}$	Współczynnik Poissona w płaszczyźnie 1-2	0,14	0,143	[-]
4	$G_{12}$	Moduł sprężystości poprzecznej w płaszczyźnie 1-2	2,91	2,92	[GPa]
5	$R_1^+$	Wytrzymałość na rozciąganie w kierunku 1	468,6	311,7	[MPa]
6	$R_1^-$	Wytrzymałość na ściskanie w kierunku 1	375,2	306	[MPa]
7	$T_{12}$	Wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie 1-2	57,03	38,4	[MPa]
8	$\varepsilon_1^+$	Odształcenia niszczące, rozciąganie w kierunku 1	0,0101	0,018	[-]
9	$\varepsilon_1^-$	Odształcenia niszczące, ściskanie w kierunku 1	0,0074	0,016	[-]
10	$\gamma_{12}$	Odształcenia niszczące, ścinanie w płaszczyźnie 1-2	0,0217	0,0322	[-]

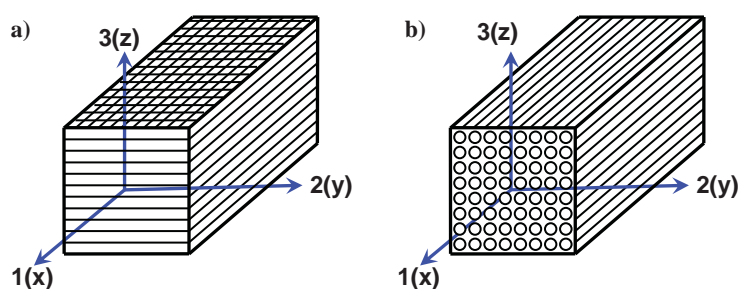
Zależności siły niszczącej od przemieszczenia, określone w próbach doświadczalnych, próbek wykonanych z kompozytów wzmocnionych włóknami węglowymi i szklanymi, przykładowo przedstawiono na rysunkach 4-7. Kompletne wyniki badań przedstawione w tabelach 2 i 3, są zgrupowane w zależności od grubości ścianki próbki, grubości warstw kompozytu i kształtu próbki oraz struktury kompozytu.

Tab. 2. Właściwości próbek wykonanych z kompozytu węgla/epoksyd  
 Tab. 2. Properties of specimens made of the carbon/epoxy composite

Nr	Struktura	$\alpha$ [°]	t [mm]	D <sub>w</sub> [mm]	t <sub>w</sub> [mm]	t <sub>sr</sub> [mm]	t <sub>z</sub> [mm]	h [mm]	z [%]	m [g]	P <sub>max</sub> [kN]	P <sub>sr</sub> [kN]	$\frac{P_{sr}}{P_{max}}$	EA [J]	WEA [kJ/kg]
1	(0/90) <sub>T</sub> /0/(0/90) <sub>T</sub>	5	1,2	59,5	0,4	0,4	0,4	75,0	42	22,8	24,4	21,4	0,877	1602	68,6
2	(0/90) <sub>T</sub> /0 <sub>2</sub> /(0/90) <sub>T</sub>	5	2,0	59,4	0,5	1,0	0,5	85,6	42	39,5	39,5	32,3	0,818	2761	69,9
3	(0/90) <sub>T</sub> /0 <sub>3</sub> /(0/90) <sub>T</sub>	5	2,2	59,5	0,4	1,4	0,4	83,4	42	42,2	46,2	34,7	0,751	2896	70,3
4	(0/90) <sub>T</sub> /0/(0/90) <sub>T</sub>	10	1,2	59,4	0,4	0,4	0,4	78,8	42	21,5	21,5	17	0,791	1336	62,2
5	(0/90) <sub>T</sub> /0 <sub>2</sub> /(0/90) <sub>T</sub>	10	2,4	59,7	0,6	1,2	0,6	83,6	42	41,3	44,8	35,1	0,783	2924	69,4
6	(0/90) <sub>T</sub> /0 <sub>3</sub> /(0/90) <sub>T</sub>	10	3,2	59,8	0,6	2,0	0,6	84,9	42	71,0	72,8	58,4	0,802	4924	70,8
7	(0/90) <sub>T</sub> /0/(0/90) <sub>T</sub>	15	1,2	58,8	0,4	0,4	0,4	54,1	42	17,4	18,1	16,5	0,912	892	51,3
8	(0/90) <sub>T</sub> /0 <sub>2</sub> /(0/90) <sub>T</sub>	15	2,0	59,2	0,5	1,0	0,5	58,0	42	23,7	27,3	22,8	0,835	1322	55,8
9	(0/90) <sub>T</sub> /0 <sub>3</sub> /(0/90) <sub>T</sub>	15	3,2	58,9	0,6	2,0	0,6	62,4	42	42,0	52,5	38,9	0,741	2426	57,8
10	(0/90) <sub>T</sub> /0/(0/90) <sub>T</sub>	20	1,2	79,5	0,4	0,4	0,4	67,0	42	25,2	14,7	13,6	0,925	911	36,4
11	(0/90) <sub>T</sub> /0 <sub>2</sub> /(0/90) <sub>T</sub>	20	2,0	78,8	0,5	1,0	0,5	68,9	42	36,0	27,9	22,5	0,806	1552	43,1
12	(0/90) <sub>T</sub> /0 <sub>3</sub> /(0/90) <sub>T</sub>	20	2,5	79,5	0,5	1,5	0,5	68,4	42	49,9	40	34,7	0,868	2373	47,6
13	(0/90) <sub>T</sub> /0/(0/90) <sub>T</sub>	0	1,7	39,3	0,6	0,5	0,6	98,2	42	28,5	27,7	21,1	0,762	2075	70,9
14	(0/90) <sub>T</sub> /0 <sub>2</sub> /(0/90) <sub>T</sub>	0	2,3	39,3	0,6	1,1	0,6	98,0	42	35,6	32,2	25,4	0,789	2489	71,0
15	(0/90) <sub>T</sub> /0 <sub>3</sub> /(0/90) <sub>T</sub>	0	3,0	39,3	0,6	1,8	0,6	102,2	42	54,6	54,5	39,4	0,723	4027	71,6
16	[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub>	0	3,0	39,3	1,0	1,0	1,0	80,2	41	41,6	65,1	49	0,753	2586	87,4
17	[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub>	5	2,1	59,5	0,7	0,7	0,7	76,3	41	35,7	43,9	35,67	0,813	2722	76,2
18	[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub>	10	2,1	59,8	0,7	0,7	0,7	77,3	41	36,4	45,8	37,25	0,813	2879	79,1
19	[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub>	15	2,1	59,3	0,7	0,7	0,7	50,6	41	24	64,2	36,16	0,563	1830	76,2
20	[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub>	20	2,4	79,4	0,8	0,8	0,8	66,1	41	50,4	68,3	48,58	0,711	3211	63,7
21	[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>3</sub> /0 <sub>2</sub> /[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>3</sub>	0	3,6	39,3	1,4	0,8	1,4	81,2	42	50,1	67,5	52,34	0,775	4250	84,5
22	[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>3</sub> /0 <sub>2</sub> /[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>3</sub>	5	2,9	59,2	1,1	0,7	1,1	83,5	42	49,4	57,8	45,92	0,794	3834	77,6
23	[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>3</sub> /0 <sub>2</sub> /[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>3</sub>	10	2,9	60,1	1,1	0,7	1,1	82,8	42	53,5	57,7	49,43	0,857	4093	76,5
24	[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>3</sub> /0 <sub>2</sub> /[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>3</sub>	15	3,2	59,3	1,2	0,8	1,2	58,7	42	44,5	72,1	56,41	0,782	3311	74,4
25	[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>3</sub> /0 <sub>2</sub> /[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>3</sub>	20	4,2	79,5	1,6	1,0	1,6	68,4	42	81,3	116	83,34	0,718	5700	70,1
26	±15/0 <sub>2</sub> /±15	0	4,1	39,3	1,4	1,3	1,4	80,5	57	67,9	73,1	60,16	0,823	4843	71,3
27	±30/0 <sub>2</sub> /±30	0	3,8	39,3	1,3	1,2	1,3	81,2	59	56,1	58	42,92	0,740	3485	62,1
28	90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub>	0	4,1	39,3	1,4	1,3	1,4	81,2	56	63,5	67	52,63	0,786	4274	67,3
29	(±45) <sub>T</sub> ] <sub>3</sub>	0	1,3	39,3	-	-	-	80,2	38	19,7	15,5	10,5	0,675	837	40,3
30	(±45) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /(±45) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub>	0	2,4	39,3	0,8	0,8	0,8	80	37	37,6	32,8	29,0	0,885	2323	61,1
31	0 <sub>3</sub>	0	2,2	39,3	-	-	-	80,1	52	30,8	49,6	30,9	0,622	2472	76,2
32	90 <sub>3</sub>	0	1,8	39,3	-	-	-	80,2	60	29,9	24,3	15,0	0,616	1201	40,2
33	(±45) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub> /[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub> /(±45) <sub>T</sub> ] <sub>2</sub>	0	4,3	39,3	1,4	1,5	1,4	80,3	50	58,3	64,9	48,2	0,743	3870	66,1
34	[(0/90) <sub>T</sub> ] <sub>6</sub>	0	2,1	39,3	-	-	-	80,8	44	27,9	30,8	26,4	0,857	2133	75,1

Tab. 3. Właściwości próbek wykonanych z kompozytu szkło/epoksyd  
 Tab. 3. Properties of specimens made of glass/epoxy composite

Nr	Struktura	$\alpha$ [°]	t [mm]	$D_w$ [mm]	$t_w$ [mm]	$t_{sr}$ [mm]	$t_z$ [mm]	h [mm]	z [%]	m [g]	$P_{max}$ [kN]	$P_{sr}$ [kN]	$\frac{P_{sr}}{P_{max}}$	EA [J]	WEA [kJ/kg]
35	mata	0	3,5	39,3	-	-	-	86,7	35	59,4	52,6	43,8	0,833	3788	63,7
36	mata	0	9	39,3	-	-	-	91	35	168,3	137,4	117,7	0,857	10706	63,6
37	mata	5	2	60	-	-	-	91,2	35	35,9	20,7	16,6	0,802	1511	42,1
38	mata	5	2,7	61,6	-	-	-	93,2	35	65,7	47	39,2	0,834	3646	55,5
39	mata	5	4	61	-	-	-	91,1	35	100,1	70,2	59,5	0,848	5415	54,2
40	mata	5	5,2	59,6	-	-	-	92	35	123,4	88,4	75,6	0,855	6955	56,4
41	mata	10	1,5	61	-	-	-	82,3	35	31,7	18,9	15,6	0,825	1279	40,4
42	mata	10	1,8	62,4	-	-	-	85,2	35	36,5	26,1	20,2	0,774	1717	47,0
43	mata	10	2,3	60,4	-	-	-	86,3	35	46	34,3	24,9	0,726	2141	46,6
44	mata	10	3,2	60,6	-	-	-	91,9	35	68,4	54,7	42,1	0,770	3831	56,0
45	mata	10	4,2	60,6	-	-	-	91,7	35	81,4	72,6	56	0,771	5096	62,6
46	mata	10	5,5	61	-	-	-	84,3	35	111,4	99,7	80,8	0,810	6787	60,9
47	mata	15	3,4	59,2	-	-	-	62,6	35	48,4	56,9	41,8	0,735	2592	53,5
48	mata	15	4,2	59,6	-	-	-	62,3	35	59,9	69,1	54,7	0,792	3391	56,6
49	mata	15	5	60	-	-	-	62,5	35	73,9	88,3	67,6	0,766	4191	56,7
50	mata	15	6,4	60,2	-	-	-	62,4	35	99,2	132,3	98,5	0,745	6107	61,6
51	mata	20	2	80	-	-	-	70,8	35	45,5	27,5	18,6	0,676	1302	28,6
52	mata	20	4,2	80,6	-	-	-	70,2	35	92,4	77,5	59,2	0,764	4144	44,8
53	mata	20	8	79	-	-	-	64,2	35	162,3	175,5	143,5	0,818	9184	56,6
54	90/0 <sub>2</sub> /90	0	2,4	39,3	0,6	1,2	0,6	80,9	55	37,5	21,9	18,6	0,849	1597	42,6
55	( $\pm 45^\circ$ ) <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /( $\pm 45^\circ$ ) <sub>2</sub>	0	3,4	39,3	1,1	1,2	1,1	90,1	49	53,4	34,1	31,7	0,930	2853	53,4
56	[ $\pm 45^\circ$ ] <sub>2</sub>	0	1,4	39,3	-	-	-	59,9	45	20,0	13,8	11,0	0,797	659	32,9
57	[(0/90) $\pi$ ] <sub>2</sub>	0	1,4	39,3	-	-	-	60,1	46	19,9	15,9	13,2	0,830	791	40,1
58	90/0/90	0	2	39,3	0,7	0,6	0,7	96	58	43,4	34,5	20,3	0,588	1953	45,0
59	90 <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /90 <sub>2</sub>	0	3,7	39,3	1,2	1,3	1,2	89,8	56	84,8	62,5	51,0	0,816	4582	54,0
60	90 <sub>3</sub> /0 <sub>3</sub> /90 <sub>3</sub>	0	5,2	39,3	1,7	1,8	1,7	94,4	56	128,3	75,6	66,3	0,877	6260	48,8
61	[(0/90) $\pi$ ] <sub>2</sub> /0 <sub>2</sub> /[(0/90) $\pi$ ] <sub>2</sub>	0	4,5	39,3	1,5	1,5	1,5	94,7	49	79,8	66,8	62,7	0,939	5921	74,1
62	[(0/90) $\pi$ ] <sub>4</sub> /0 <sub>4</sub> /[(0/90) $\pi$ ] <sub>4</sub>	0	7	39,3	2,3	2,4	2,3	97,3	48	150,7	164,2	120,0	0,731	11680	77,4
63	( $\pm 45^\circ$ ) <sub>2</sub> /[(0/90) $\pi$ ] <sub>2</sub> /( $\pm 45^\circ$ ) <sub>2</sub>	0	4,5	39,3	1,5	1,5	1,5	92,6	44	84,1	69,0	53,0	0,768	4895	58,4
64	$\pm 15^\circ$ /0 <sub>2</sub> / $\pm 15^\circ$	0	4,5	39,3	1,5	1,5	1,5	99,1	55	97,3	50,2	41,0	0,817	4070	47,5
65	0 <sub>3</sub>	0	2,5	39,3	-	-	-	96,6	54	50,7	32,1	22,0	0,685	2126	41,9
66	90 <sub>3</sub>	0	3	39,3	-	-	-	80,7	55	60,3	32,8	23,0	0,701	1856	30,8
67	$\pm 30^\circ$ /0 <sub>2</sub> / $\pm 30^\circ$	0	4,4	39,3	1,5	1,4	1,5	93,6	56	94,7	43,3	33,0	0,762	3085	32,6



Rys. 3. Kierunki wzmocnienia kompozytów: a) kompozyt ortotropowy, b) monotropowy  
 Fig. 3. Directions of composite strengthening a) orthotropic composite, b) monotropic

Wyniki badań, jako średnie z kilku prób, wyszczególnione w tabelach 2 i 3, cechują charakterystyczne wielkości, które oznaczają:

$P_{\max}$  – maksymalna siła niszcząca, tj. pierwszy pik na krzywej  $P - \Delta l$ , która wykazuje początek niszczenia;

$EA$  – absorbowana energia uderzenia, równoważna powierzchni pod krzywą  $P - \Delta l$ ;

$P_{\text{śred}}$  – średnie obciążenie, które jest równe ( $P_{\text{śred}} = EA/\Delta l_{\max}$ );

$WEA$  – względna energia absorbowana  $WEA = EA/m_c$  – gdzie  $m_c$  jest masą części próbki zniszczonej;

$\alpha$  – połówkowy kąt stożka;

$t$  – grubość ścianki;

$D_w$  – średnica wewnętrzna (dla stożka średnica większa, podstawy)

$t_w$  – grubość warstwy wewnętrznej

$t_{sr}$  – grubość warstwy środkowej

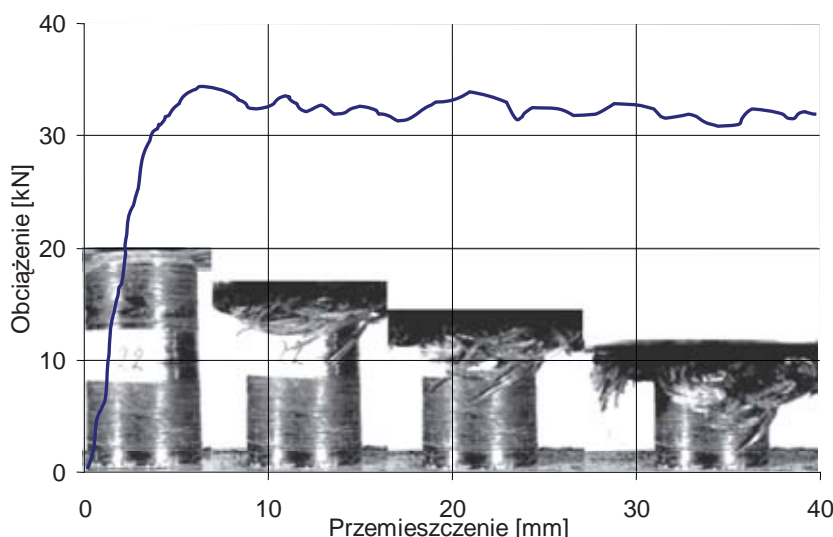
$t_z$  – grubość warstwy zewnętrznej

$h$  – wysokość próbki

$z$  – wagowa zawartość włókien w kompozycie

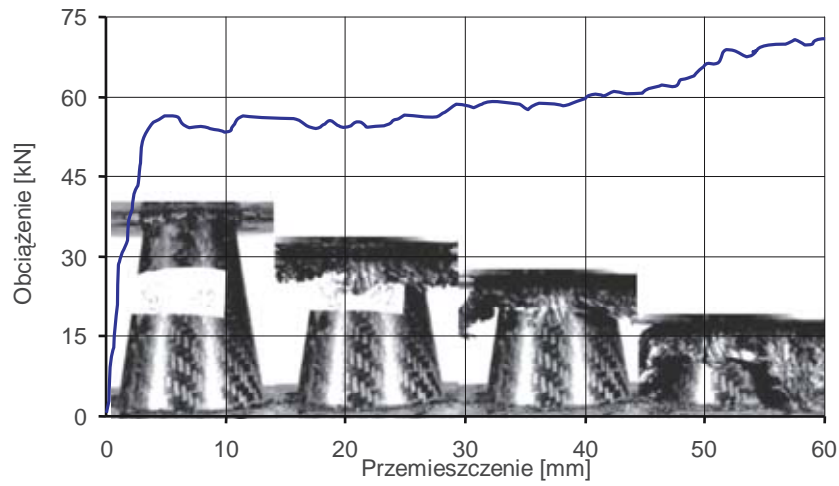
$m$  – masa próbki

$\gamma$  – indeks jednolitości siły ( $P_{\text{śred}}/P_{\max}$ )

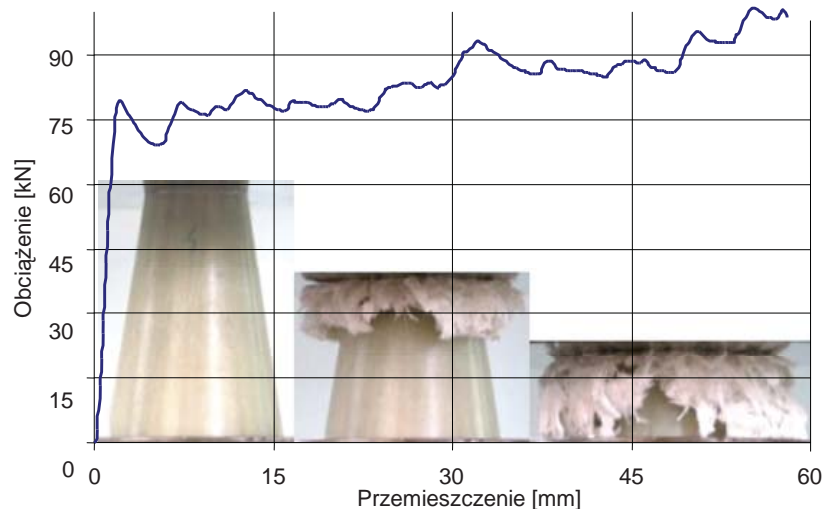


Rys. 4. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia kompozytu węgiel/epoksyd  
 Fig. 4. Crush failure force dependence on displacement for the carbon/epoxy composite

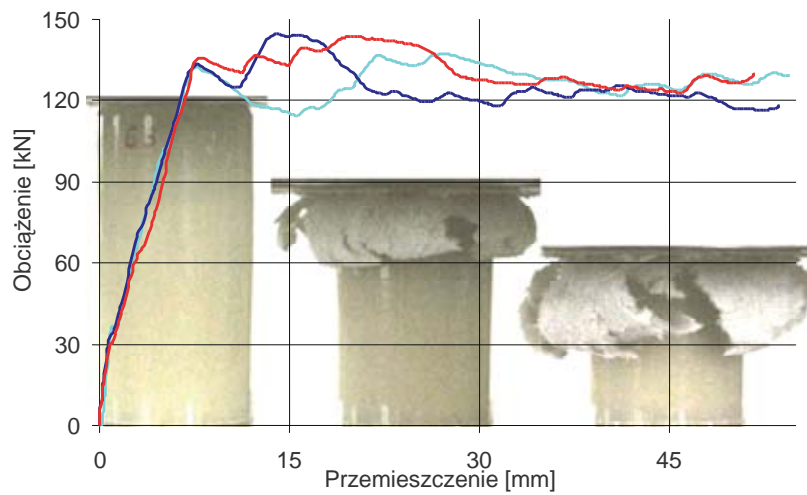
Zależności  $P - \Delta l$  dla próbek o jednakowej strukturze przedstawione na rys.7, wykazują mały rozrzut wyników.



Rys. 5. Postępujące niszczenie próbki wykonanej z kompozytu węgiel/epoksyd  
Fig. 5. Progressive failure of a specimen made of the carbon/epoxy composite



Rys. 6. Zależność  $P-\Delta l$  dla próbki w postaci stożka (szkło/epoksyd)  
Fig. 6. The  $P-\Delta l$  dependence for a cone shaped specimen (glass/epoxy)



Rys. 7. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia 3-ch próbek z kompozytu epoksydowego wzmocnionego matą szklaną  
Fig. 7. Crush failure force dependence on displacement for 3 specimens made of the epoxy composite reinforced with a glass mat



Na podstawie wyników badań próbek, w kształcie rurek wykonanych z kompozytu szkło/epoksyd i węgiel/epoksyd, można stwierdzić, że największą WEA mają próbki, wykonane z kompozytu epoksydowego wzmocnionego włóknami węglowymi, których warstwy zewnętrzne i wewnętrzne są wykonane z rowingowych tkanin przejmujących naprężenia obwodowe, natomiast warstwy wewnętrzne – z rowingu ułożonego równoległe do osi próbki, zwiększające wytrzymałość na zginanie warstw.

### Porównanie wyników badań próbek wykonanych kompozytów C/E i S/E

Na wyższą wartość WEA mają wpływ wyższe właściwości mechaniczne kompozytów epoksydowych wzmocnionych włóknami węglowymi w porównaniu z kompozytami wzmocnionymi włóknami szklanymi – patrz tabela 1a i 1b.

Na podstawie wyników przedstawionych w tabelach 2 i 3, możemy wnioskować, że parametry, które w sposób istotny wpływają na zginanie i kruszenie w próbach, są: rodzaj włókien wzmacniających warstwę, zawartość włókien w kompozycie, orientacja włókien w warstwie, sekwencja ułożenia warstw oraz liczba warstw.

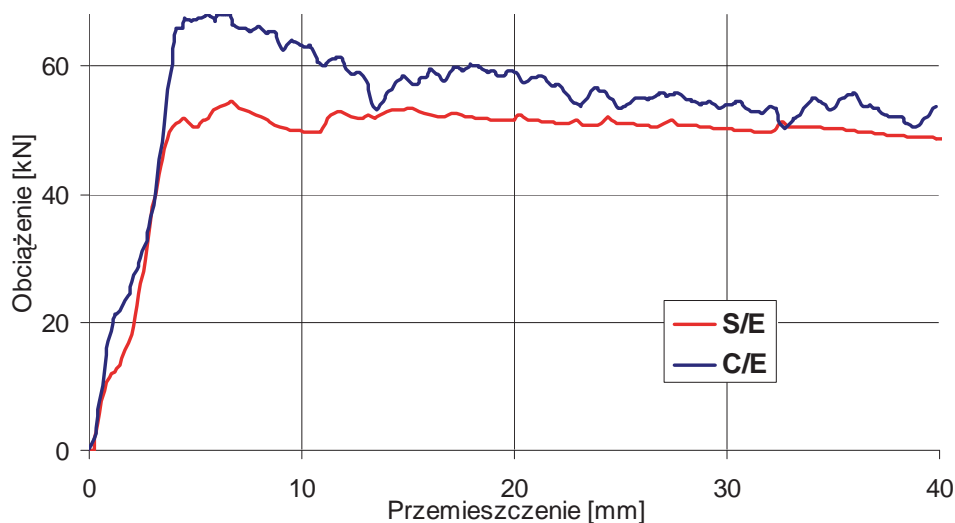
Nachylenie pierwszej części wykresu  $P - \Delta l$ , w próbach, zależy od sztywności zginania kompozytu (przy niszczeniu dominuje zginanie warstw) i wywołuje inicjację zginania końca próbki. Nachylenie to zależy od stałych materiałowych kompozytu a w szczególności:

- kąt nachylenia jest większy w przypadku gdy próbki z kompozytu C/E mają właściwości mechaniczne wyższe od kompozytu S/E, przy tej samej grubości kompozytu i orientacji włókien;
- dla próbek wykonanych z tych samych składników i o tej samej orientacji włókien, nachylenie zależności  $P - \Delta l$  jest znacznie większe przy większej grubości kompozytu, ponieważ większa grubość kompozytu powoduje większy moment bezwładności przekroju i sztywność zginania.

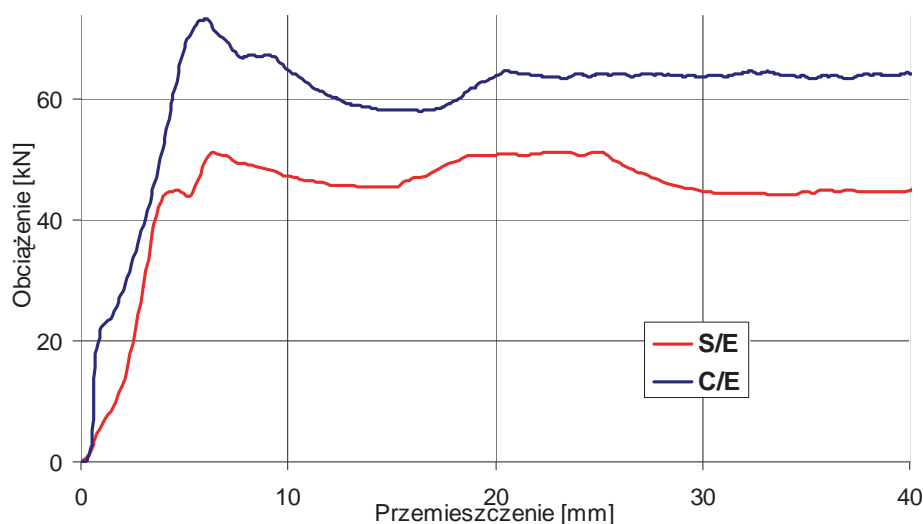
## 5. Wpływ niektórych czynników na WEA

### Wpływ rodzaju włókien

Rola właściwości mechanicznych włókien w warstwie, a w szczególności modułów sprężystości i niszczących odkształceń przy ścinaniu i ściskaniu, decydują o modelu niszczenia przy drugim i następnym pikie, na wykresie  $P - \Delta l$ . Większe moduły sprężystości zwiększają sztywności zginania, które powodują większą siłę niszczącą i większą WEA. Na rysunku 8 i 9 przedstawiono dla wybranych struktur, zależności  $P - \Delta l$  kompozytów węglowo-epoksydowych i szklano-epoksydowych.

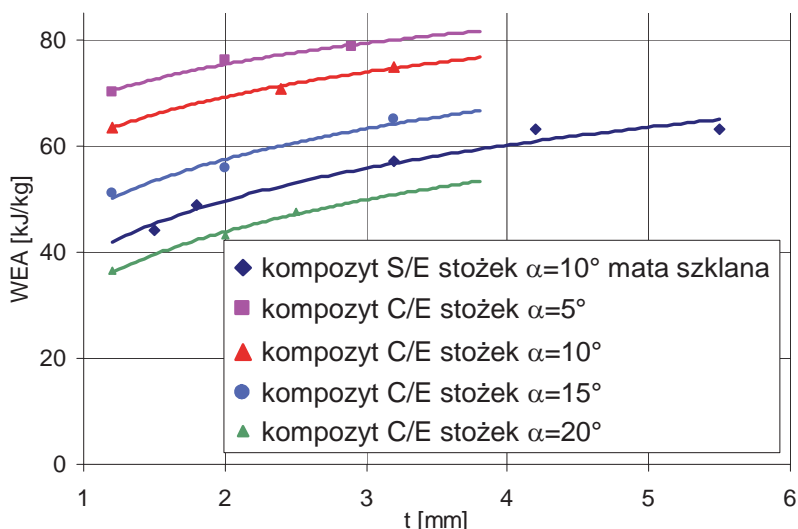


Rys. 8. Zależności  $P-\Delta l$  dla rurek o strukturze  $90_2/0_2/90_2$  wykonanych z kompozytu szkło/epoksyd i węgiel epoksyd  
Fig. 8.  $P-\Delta l$  dependence for tubes of the structure  $90_2/0_2/90_2$  made of glass/epoxy and carbon/epoxy composites



Rys. 9. Zależności  $P-\Delta$  dla rurek o strukturze  $\pm 15_2/0_2/\pm 15_2$  wykonanych z kompozytu szkło/epoksyd i węgiel/epoksyd  
 Fig. 9.  $P-\Delta$  dependence for tubes of the structure  $\pm 15_2/0_2/\pm 15_2$  made of glass/epoxy and carbon/epoxy composites

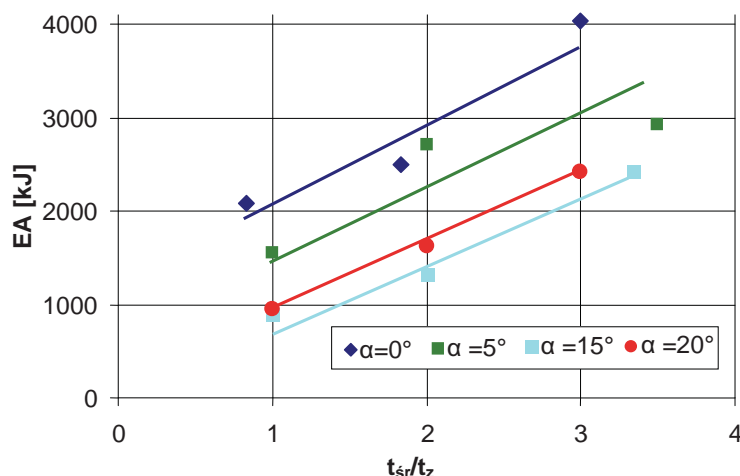
Zależność EA, od grubości kompozytu jest znaczna, ponieważ grubość kompozytu wpływa na wytrzymałość zginania, co uwidacznia się nachyleniem zależności siła – przemieszczenia w jej początkowej fazie. Większa grubość wpływa na większą sztywność zginania ( $EI$ ), która zależy od grubości w potęgze trzeciej, w wyniku czego rośnie siła potrzebna do uzyskania niezbędnej deformacji. Sztywność zginania, zależy od modułu sprężystości wzdłużnej  $E$ , który zależy od rodzaju i struktury kompozytów – rys. 10. Z zależności przedstawionej na rys. 11 wynika, że wraz ze wzrostem grubości warstwy środkowej ( $t_{sr}$ ) wzrasta WEA, ponieważ warstwa ta ma włókna ułożone równoległe do kierunku działania siły ściskającej, przejmującej znaczne obciążenia.



Rys. 10. Wpływ grubości ścianki stożka na zdolność pochłaniania energii wzmocnionych kompozytów epoksydowych  
 Fig. 10. Influence of the cone wall's thickness on the absorbing energy capability of reinforced epoxy composites

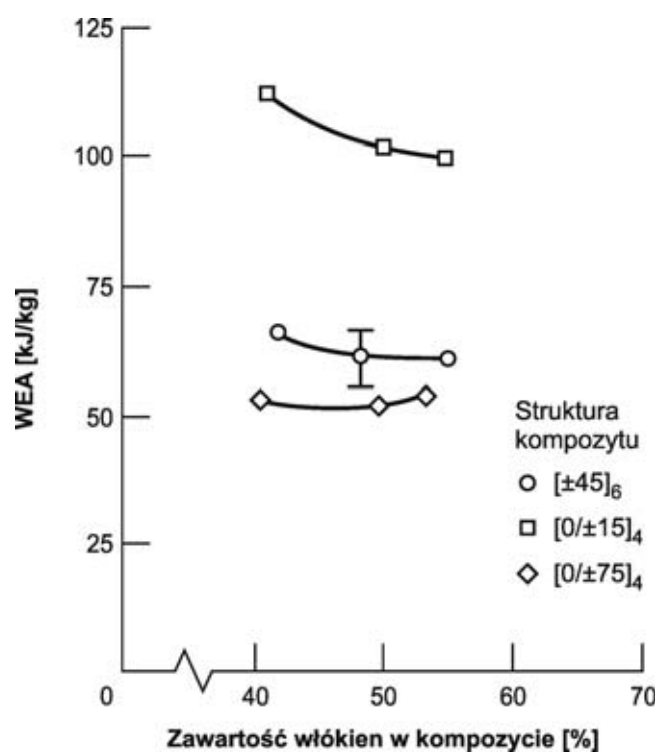
Wpływ zawartości włókien w kompozycie decyduje o różnych właściwościach mechanicznych kompozytu, co ma wpływ na zginanie i kruszenie próbki. Wynikiem wyższej zawartości włókien w kompozycie jest wyższa sztywność zginania i wytrzymałość warstwy włókien i całego kompozytu. Jednak zbyt duża zawartość włókien powoduje mniejszą adhezję włókien do żywicy, a za tym i mniejszą zdolność pochłaniania energii. Według pracy [5] kompozyt węglowo-epoksydowy T300/934 o zawartości włókien z zakresu od 40 do 55% ma najwyższą zdolność pochłaniania energii. W badanych rurkach orientacja włókien w warstwach była  $[\pm 45^\circ]_6$ ,  $[0/\pm 15^\circ]_4$

i  $[0/\pm 75^\circ]_4$ . Wyniki badań wpływu zawartości włókien w kompozycie na WEA przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 11. Zależność EA od stosunku grubości warstw  $t_{sr}/t_z$ , dla rurek i stożków o strukturze  $[(0/90)_T]_n/0_n/[(0/90)_T]_n$  wykonanych z kompozytu węgiel/epoksyd

Fig. 11. Dependence of AE on the  $t_{sr}/t_z$  ratio for tubes and cones of the structure  $[(0/90)_T]_n/0_n/[(0/90)_T]_n$  made of carbon/epoxy composites

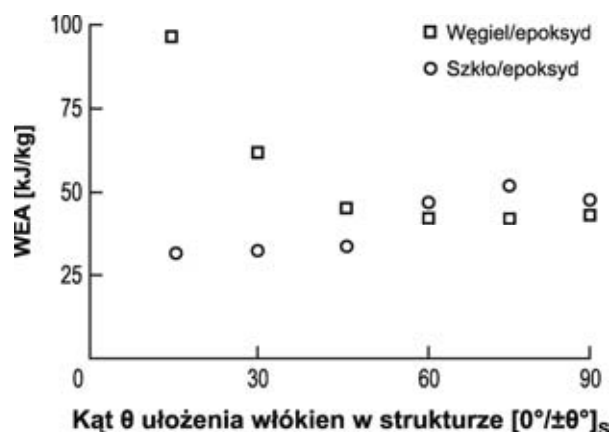


Rys. 12. Zależność WEA od zawartości włókien w kompozycie T300/934 [5] (próbki w kształcie rurek)

Fig. 12. Effect of fiber volume fraction on the energy absorption capability of T300/934 composite tubes

**Orientacja włókien w warstwach**, wywiera wpływ taki jak wywiera na właściwości mechaniczne to jest sztywność zginania, odkształcenia niszczące rozciągania i ściskania oraz wytrzymałość. Badania wykazały, że najlepszą zdolność pochłaniania energii ma kompozyt o strukturze  $(0/90)_T/0/(0/90)_T$ .

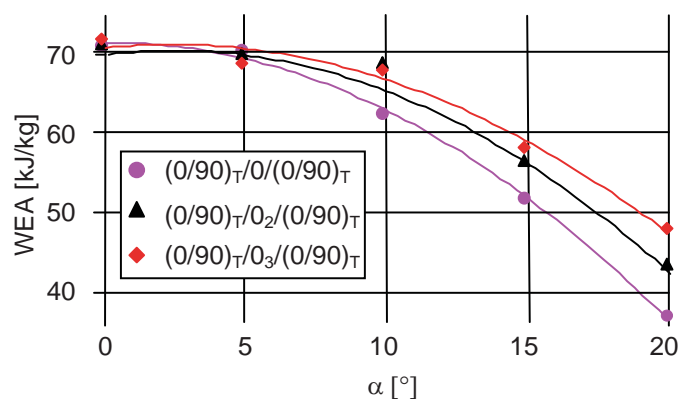
WEA maleje wraz ze wzrostem kąta połówkowego stożka, co spowodowane jest wzrostem momentu zginającego warstwy. W mechanizmie niszczenia próbek w postaci stożków dominuje zginanie warstw.



Rys. 13. Zależność energii absorpcji od rodzaju kompozytu i orientacji włókien [5]

Fig. 13. Effect of ply orientation on the SAE

Wyniki badań wpływu połówkowego kąta stożka ściętego na wartość EA przedstawiono na rysunku 14, z którego wynika, że największą zdolność pochłaniania energii wykazują próbki o kącie równym zero, czyli próbki w postaci rurek. Spadek WEA wraz ze wzrostem kąta jest z powodowany wzrostem momentu gnącego podczas niszczenia próbek.



Rys. 14. Zależność WEA od kąta  $\alpha$  dla wybranych struktur kompozytów epoksydowych wzmocnionych włóknami węglowymi

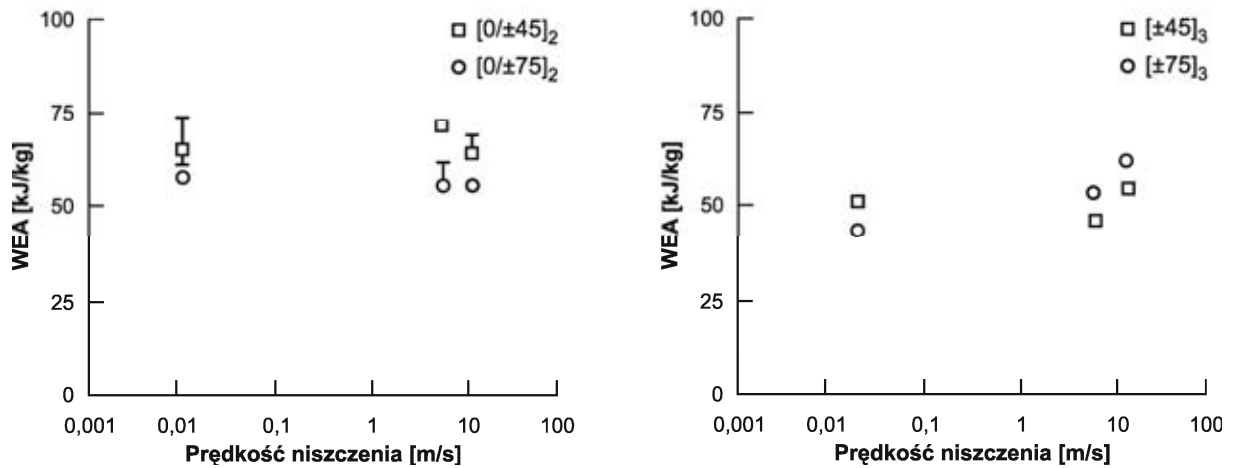
Fig. 14. Dependence of SAE on the  $\alpha$  angle for selected structures of epoxy composites reinforced with carbon fibres

### Wpływ prędkość odkształceń

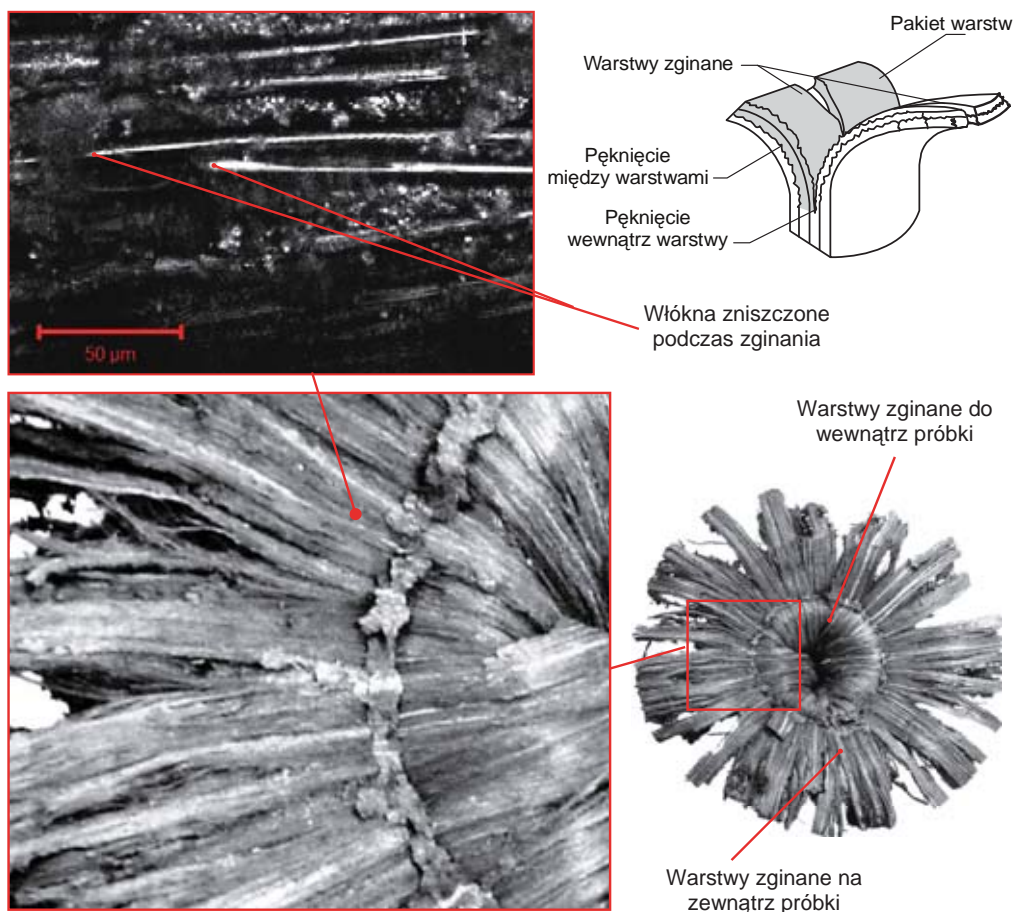
Wielu autorów wykazało dyskusyjny wpływ prędkości odkształceń na EA. Kilku autorów stwierdza wzrost WEA wraz ze wzrostem prędkości obciążenia, inni podają zmniejszenie EA. W pracy [4] stwierdza się wzrost o 35% WEA badanych rurek wykonanych z kompozytu węgiel/epoksyd o strukturze  $[\pm\theta]_3$  przy wzroście prędkości przemieszczeń niszczących od 0,01 do 12 m/s. Szczególnie, WEA rurek o strukturze  $[0/\pm\theta]_2$  i  $[\pm\theta]_3$  wykonanych z kompozytu aramid/epoksyd wykazują wzrost WEA od 20 do 45%. Jednak rurki o strukturze  $[0/\pm\theta]_2$  wykonane z kompozytu węgiel/epoksyd nie były wrażliwe na prędkość odkształceń i nie wykazywały wzrostu EA.

## 6. Mechanizm niszczenia próbek

Badane próbki niszczyły się przez zginanie i kruszenie warstw. Ten mechanizm niszczenia charakteryzuje się bardzo długimi międzywarstwowymi, wewnątrzwarstwowymi i równoległymi do włókien pęknięciami. Główną przyczyną powstania absorpcji energii jest praca zużyta na wzrost pęknięć osnowy. Przede wszystkim, kształt i wzrost pęknięć międzywarstwowych i kształt oraz wzrost pęknięć wewnątrz pojedynczych warstw.



Rys. 15. Wpływ prędkości niszczenia na energię absorpcji rurek z kompozytu T300/934 [4]  
 Fig. 15. Effect of crushing speed on the energy absorption capability of T300/934 composite tubes



Rys. 16. Mechanizm niszczenia przez delaminacje i zginanie warstw  
 Fig. 16. Delamination and lamina bending crushing mode

Pęknięcia równoległe do włókien, propagują wzdłuż włókien, wewnątrz warstwy lub wewnątrz warstw o wspólnie zorientowanych włóknach. Warstwy wykazują znaczące deformacje pochodzące od zginania. Dwie dodatkowe, mniej ważne przyczyny wzrostu EA są związane z tarciem pomiędzy próbką a płytami, występują podczas niszczenia warstwy zginanej. Kiedy warstwa jest zginana, wówczas występuje poślizg wzdłuż powierzchni płyty maszyny

wytrzymałościowej. Tarcie powstaje również pomiędzy warstwami, które wykonują ruch między sobą podczas zginania

## 7. Podsumowanie

Na podstawie przeglądu literatury i badań własnych, dotyczących konstrukcji energochłonnych, można uogólnić, że 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 ich składniki, z których wykonany jest kompozyt lub powłoka przekładkowa typu sandwich. Konstrukcje energochłonne, w szczególności wykonane z kompozytów, których elementy mogą przyjmować różne kształty, pozwalają projektować na żadaną wartość pochłanianej energii, a mechanizm niszczenia konstrukcji podczas zderzenia, zapewni uzyskanie wysokiej energii absorpcji.

### Literatura:

- [1] Wiggenraad, J. F.M., Zhang, X., Davies, G A. O., *Impact damage prediction and failure analysis of heavily loaded, blade-stiffened composite wing panels*, Composite Structures March 1998.
- [2] Ochelski, S., *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*, WNT Warszawa 2004.
- [3] Mamalis, A. G., Manolacos, DE, Viegelaahn, GL *Crashworthy Characteristics of Thin Fibre-Reinforced Composite Frusta Under Axial Collapse*, International Journal of Vehicle Design, Vol. 10, No. 2, str. 165-174, 1989.
- [4] Farley, G. L., *The Effects of Crushing Speed on the Energy-Absorption Capability of Composite Tubes*, Journal of Composite Materials, Vol. 25, str. 1314-1329, 1991.
- [5] Farley, G. L, Jones, R. M., *Energy Absorption Capability of Composite Tubes and Beams*, NASA TM-101634, AVSCOM TR-89-B-003, 1989.