



Doświadczalna ocena zdolności pochłaniania energii kompozytów węglowo-epoksydowych i szklano-epoksydowych

STANISŁAW OCHELSKI, PAWEŁ GOTOWICKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy opisano doświadczalne badania zdolności pochłaniania energii przez kompozyty węglowo-epoksydowe i szklano-epoksydowe, których wyniki badań porównano. 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.

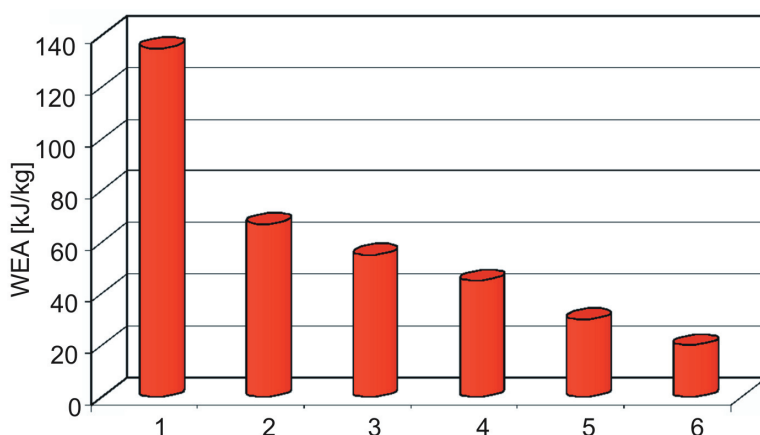
Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, energia absorpcji, badania doświadczalne

Symbole UKD: 678.7.01

1. Wprowadzenie

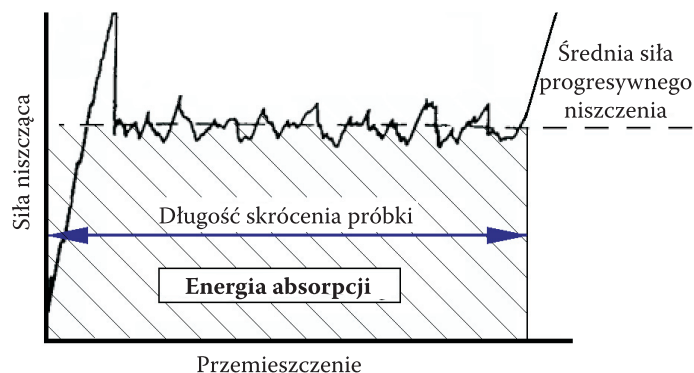
Konstrukcje energochłonne są zdolne do przejęcia energii kinetycznej w czasie uderzenia, której ujemny przyrost jest równoważny pracy niszczenia (kruszenia, łamania) konstrukcji. Obecnie konstrukcje energochłonne mają szerokie zastosowanie między innymi w przemyśle lotniczym (minimalizują skutki lądowań 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/ρ , E/ρ), ale także największą względną energię absorpcji WEA (energię absorpcji odniesioną do masy), w porównaniu do metali i ich stopów, co wykazano na rysunku 1.



Rys. 1. WEA w zależności od rodzaju materiału: 1 — węgiel/PEEK, 2 — węgiel/epoksyd, 3 — szkło/epoksyd, 4 — krótkie włókna szklane/epoksyd, 5 — stal, 6 — aluminium [3]

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 pokruszona (zniszczona) na najmniejsze cząsteczki. Typowy wykres zależności siły niszczącej od przemieszczenia (skrócenia próbki) przedstawiono na rysunku 2.

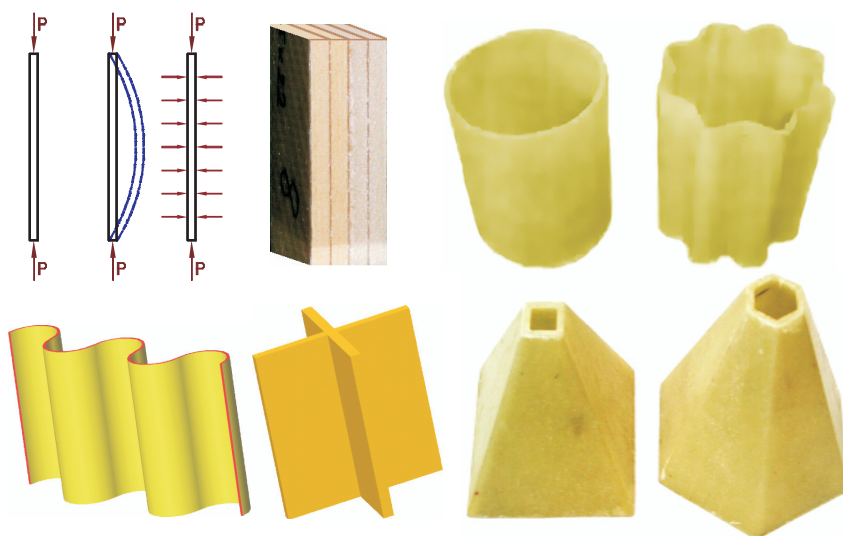


Rys. 2. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia (skrócenia)

Proces progresywnego niszczenia zależy głównie 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. Elementy cienkościenne są narażone na wyboczenie i gwałtowne niszczenie. Można temu zapobiec przez podparcie ścianki 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 (rys. 3).

Celem publikacji jest odpowiedni dobór elementów projektowanej konstrukcji.



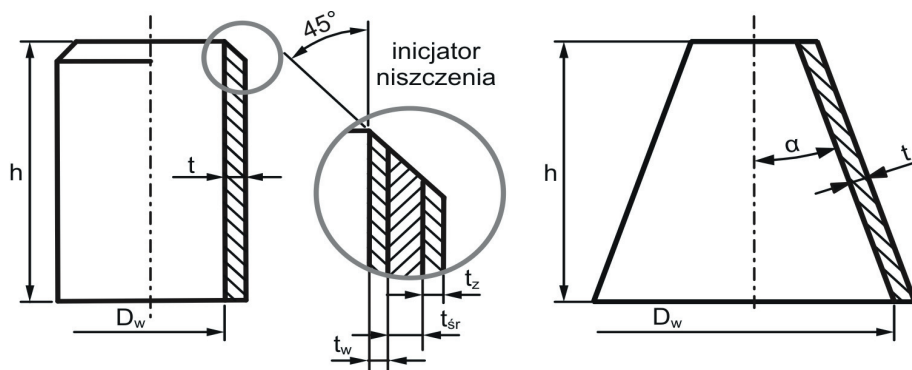
Rys. 3. Kształty elementów energochłonnych

2. Przedmiot i metoda badań

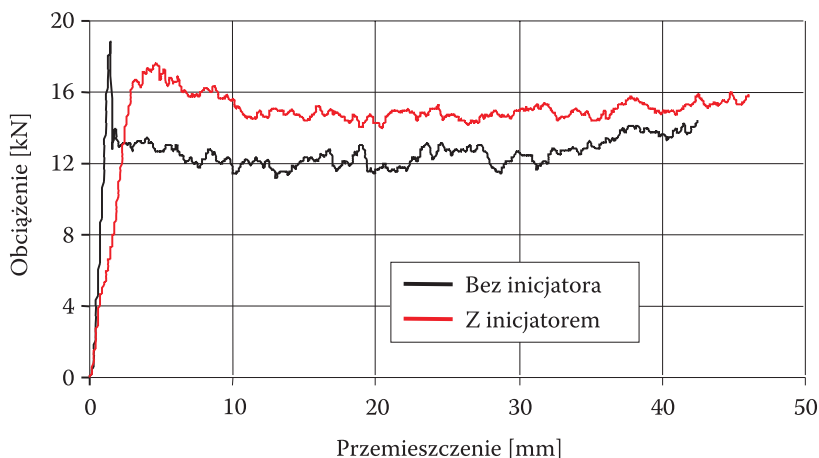
Przedmiotem badań były próbki wykonane z kompozytów epoksydowych (E-53) wzmocnionych włóknami szklanymi w postaci: tkaniny rowingowej marki STR-012-350-110, o gramaturze 350 g/m^2 , pasmami rowingu marki ES-10-400-0-60 i matą szklaną o gramaturze 316 g/m^2 oraz włóknami węglowymi w postaci: tkaniny rowingowej 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 tabelach 1a i 1b.

Do badań zdolności pochłaniania energii uderzenia przyjęto próbki, które miały kształt rurek o średnicy wewnętrznej $D_w = 49,3$ mm oraz ściętych stożków o połówkowym kącie wierzchołkowym równym $\alpha = 5, 10, 15$ i 20° o grubości ścianki z zakresu $t = 1,2 \div 9$ mm (rys. 4). Próbki w kształcie rurek, na jednej powierzchni czołowej mają wykonane ścięcia pod kątem 45° , spełniające rolę inicjatora niszczenia, które powodują znaczne zmniejszenie P_{max} i zapewniają proces progresywnego niszczenia.



Rys. 4. Kształty próbek zastosowanych w badaniach



Rys. 5. Wpływ zastosowania inicjatora niszczenia na zależność $P-\Delta$

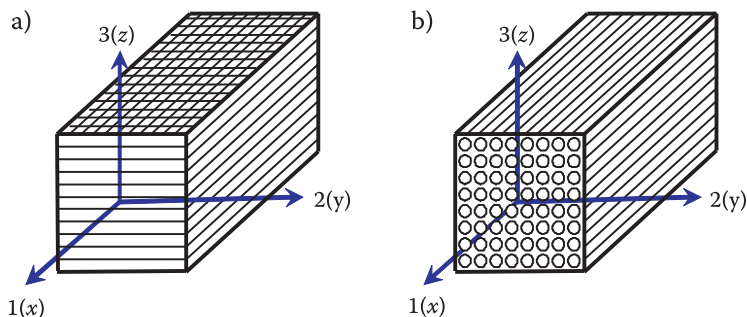
Próbki w postaci ściętych stożków nie wymagają wykonania inicjatora w postaci ścięcia krawędzi, ponieważ początek niszczenia rozpoczyna się od mniejszej średnicy stożka, w której występują największe naprężenia. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań próbek w kształcie rurek wykonanych z kompozytu epoksydowego wzmocnionego włóknami szklanymi, z inicjatorem i bez inicjatora. 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 $P_{niszcz.} - \Delta l$, w przypadku badania próbki bez inicjatora, która powoduje wstępne niszczenie całej objętości próbki, w wyniku czego podczas dalszej próby mniejsza jest siła niszcząca, 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 prostopadle do osi próbki; $[(0/90)_T]$ — warstwę wzmocnioną tkaniną. Środkowe warstwy ścianki próbki miały zazwyczaj włókna ułożone równoległe do osi próbki. Badano też próbki z kompozytów wzmocnionych matą szklaną.

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

3. Wyniki badań

Wyniki badań właściwości mechanicznych kompozytów epoksydowych wzmocnionych włóknami węglowymi i szklanymi przedstawiono w tabelach 1a i 1b, a oznaczenia przyjętych kierunków kompozytu monotropowego i ortotropowego przedstawiono na rysunku 6. Określone właściwości mechaniczne są niezbędne



Rys. 6. Kierunki wzmocnienia kompozytów: a) kompozyt ortotropowy; b) monotropowy

TABELA 1a

Właściwości mechanicznych epoksydowych kompozytów monotropowych wzmocnionych włóknami szklanymi i węglowymi

Lp.	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	ν_{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	ϵ_1^+	Odształcenia niszczące, rozciąganie w kierunku 1	0,011	0,02	[-]
9	ϵ_1^-	Odształcenia niszczące, ściskanie w kierunku 1	0,0065	0,011	[-]
10	γ_{12}	Odształcenia niszczące, ścinanie w płaszczyźnie 1-2	0,027	0,035	[-]

TABELA 1b

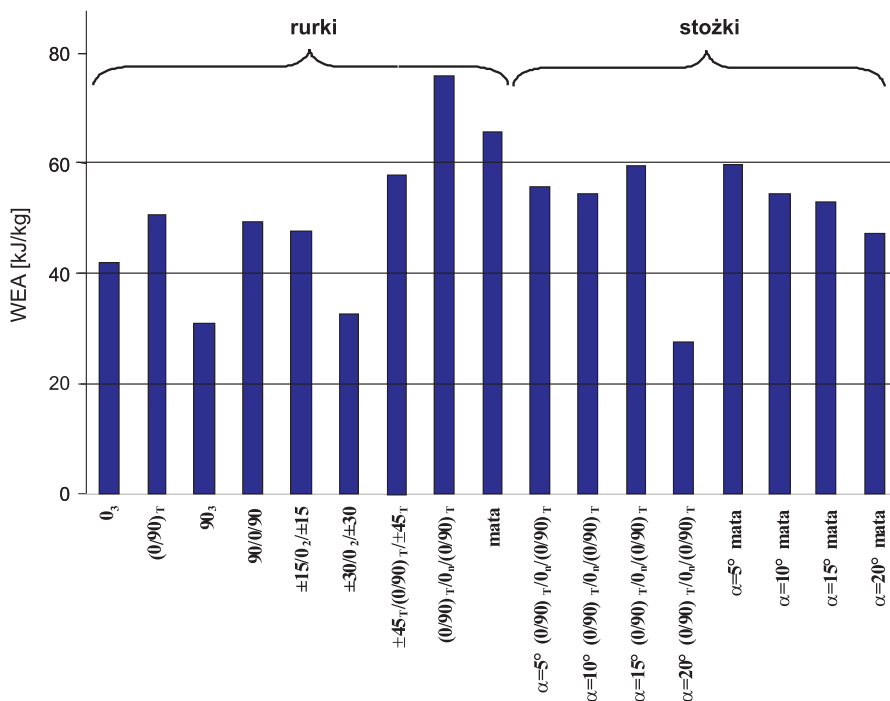
Właściwości mechanicznych ortotropowych kompozytów epoksydowych wzmocnionych tkaninami szklanymi i węglowymi

Lp.	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	ν_{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]

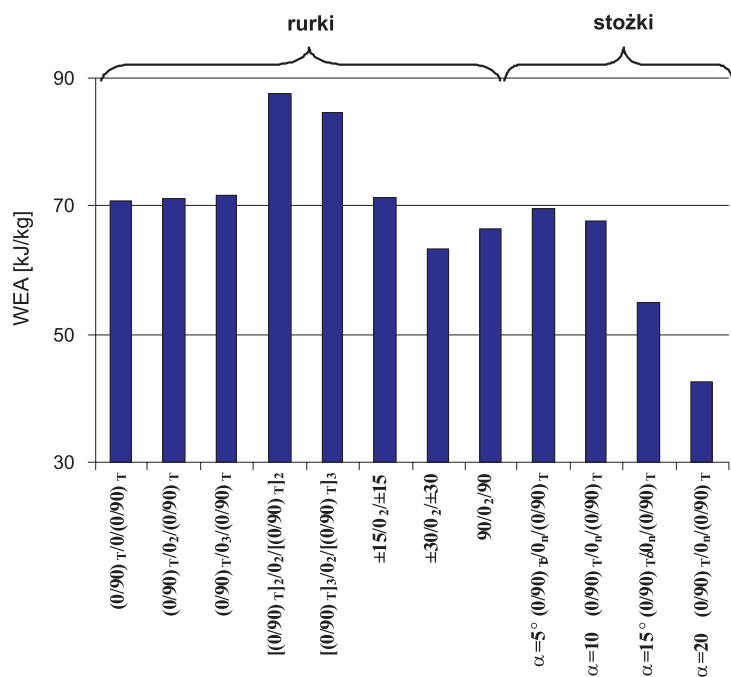
cd. tabeli 1b

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	ε_1^+	Odształcenia niszczące, rozciąganie w kierunku 1	0,0101	0,018	[-]
9	ε_1^-	Odształcenia niszczące, ściskanie w kierunku 1	0,0074	0,016	[-]
10	γ_{12}	Odształcenia niszczące, ścinanie w płaszczyźnie 1-2	0,0217	0,0322	[-]

do numerycznej symulacji niszczenia progresywnego kompozytu. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono zależności WEA od struktury kompozytów szkło/epoksyd i węgiel/epoksyd.



Rys. 7. Zależność zdolności pochłaniania energii od struktury kompozytu szkło/epoksyd



Rys. 8. Zależność zdolności pochłaniania energii od struktury kompozytu węgiel/epoksyd

Wyniki badań, jako średnie z kilku prób, cechują charakterystyczne wielkości, które oznaczają:

P_{\max} – maksymalną siłę niszczącą, tj. pierwszy pik na krzywej $P-\Delta l$, która wykazuje początek niszczenia;

EA – absorbowaną energię uderzenia, równoważną powierzchni pod krzywą $P-\Delta l$;

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

WEA – względną energię absorbowaną $WEA = EA/m_c$ — gdzie m_c jest masą części próbki zniszczonej;

α – połówkowy kąt stożka;

t – grubość ścianki;

D_w – średnicę wewnętrzną (dla stożka średnica większa, podstawy)

t_w – grubość warstwy wewnętrznej

$t_{\text{śr}}$ – grubość warstwy środkowej

t_z – grubość warstwy zewnętrznej

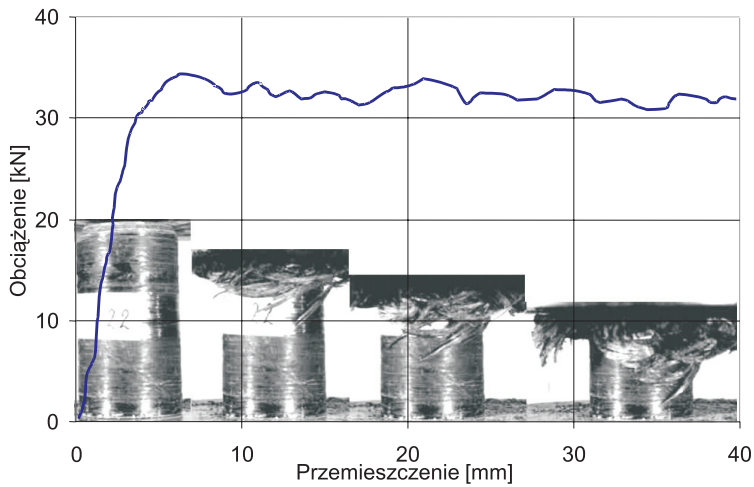
h – wysokość próbki

z – wagową zawartość włókien w kompozycie

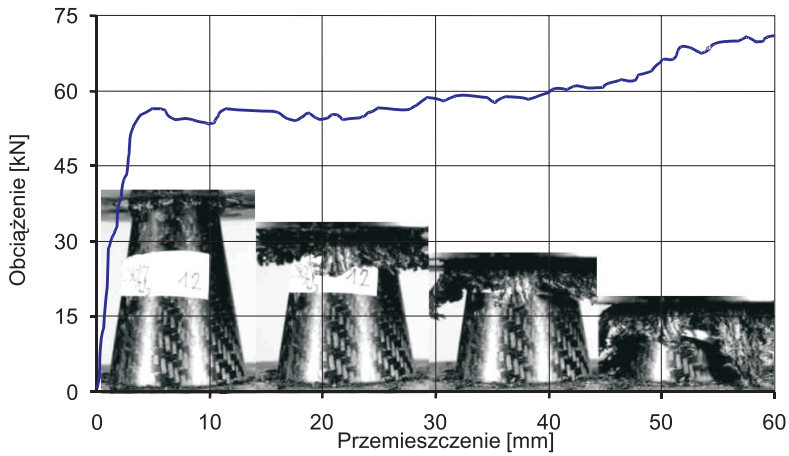
m – masę próbki

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

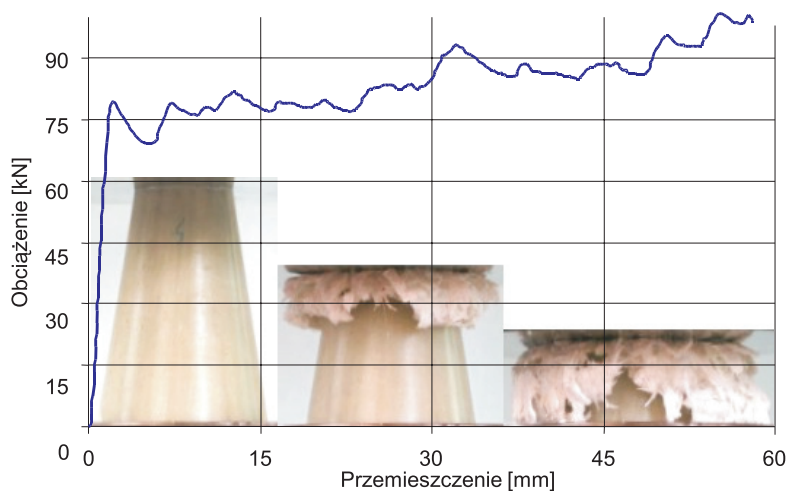
Zależności siły niszczącej od przemieszczenia, określone w próbach doświadczalnych, próbek wykonanych z kompozytów wzmocnionych włóknami węglowymi i szklanymi, przykładowo przedstawiono na rysunkach 9-12.



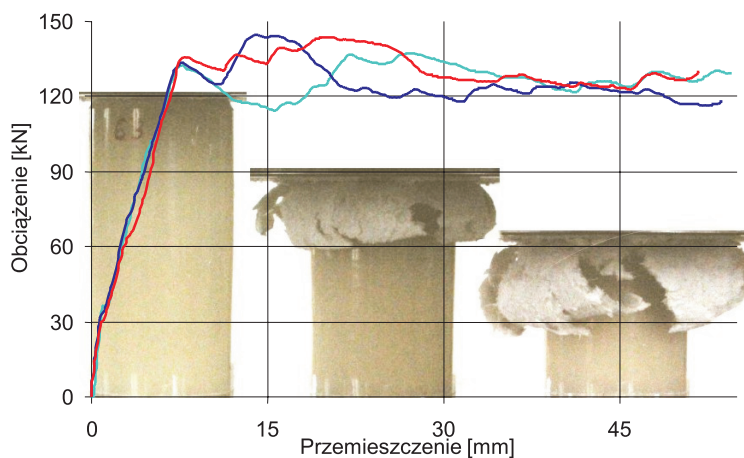
Rys. 9. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia kompozytu węgiel/epoksyd



Rys. 10. Postępujące niszczenie próbki wykonanej z kompozytu węgiel/epoksyd



Rys. 11. Zależność P- Δ l dla próbki w postaci stożka (szkło/epoksyd)



Rys. 12. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia trzech rurek z kompozytu epoksydowego wzmocnionego matą szklaną

Fotografie otrzymane podczas badania kompozytów wzmocnionych włóknami węglowymi i szklanymi, w trakcie progresywnego niszczenia próbek, przedstawiono na rysunkach 9-12. Zależności P- Δ l dla próbek o jednakowej strukturze przedstawione na rysunku 12, wykazują mały rozrzut wyników.

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.

4. Porównanie wyników badań próbek wykonanych kompozytów C/E i S/E

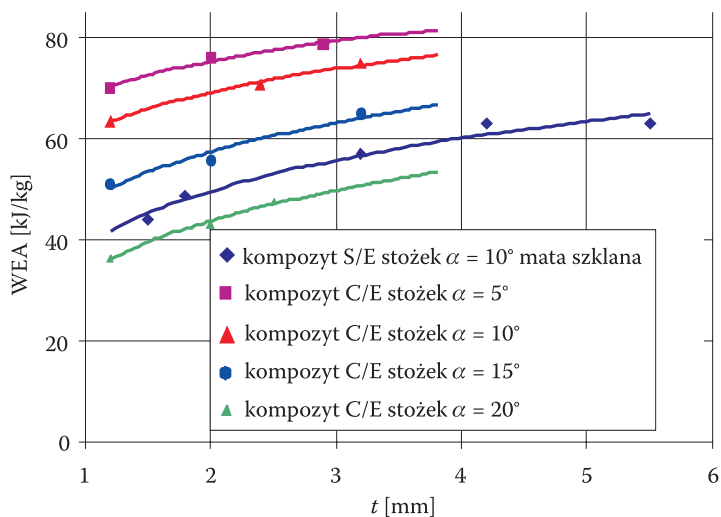
Na wyższą wartość WEA mają wpływ wyższe właściwości mechaniczne kompozytów epoksydowych wzmocnionych włóknami węglowymi w porównaniu z kompozytami wzmocnionymi włóknami szklanymi — patrz tabele 1a i 1b.

Na podstawie wyników badań możemy wnioskować, że parametrami, 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.

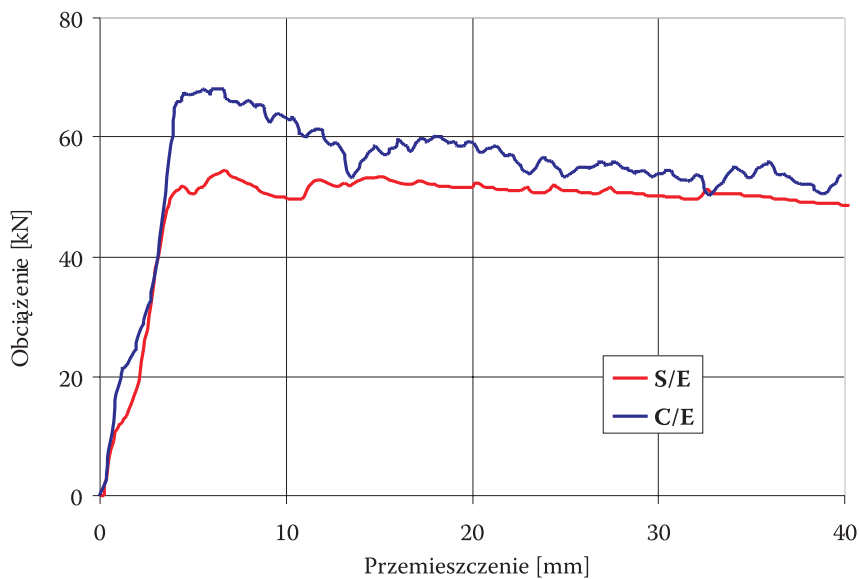
Nachylenie pierwszej części wykresu $P-\Delta l$, w próbach, zależy od sztywności zginania kompozytu (przy niszczeniu dominuje zginanie warstw) i wywołuje inicjację zginania końca próbki. Nachylenie to zależy od stałych materiałowych kompozytu, a w szczególności:

- 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.

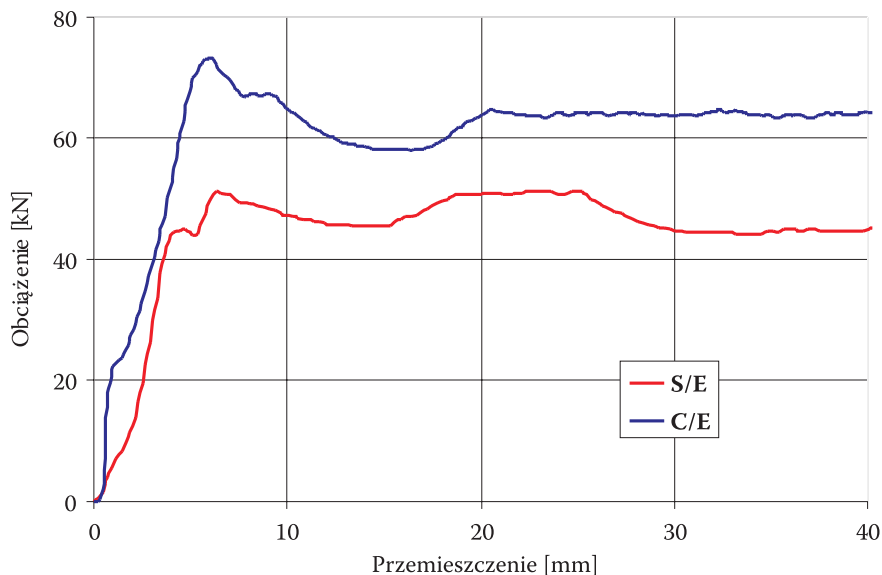
Rola właściwości mechanicznych włókien w warstwie, a w szczególności modułów sprężystości i niszczących odkształceń przy ścinaniu i ściskaniu, decydują o modelu niszczenia przy drugim i następnym piku, na wykresie $P-\Delta l$. Większe moduły sprężystości zwiększają sztywności zginania, które powodują większą siłę niszczącą i większą WEA. Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono dla wybranych struktur, zależności $P-\Delta l$ kompozytów węglowo-epoksydowych i szklano-epoksydowych.



Rys. 13. Wpływ grubości ścianki stożka na zdolność pochłaniania energii wzmocnionych kompozytów epoksydowych



Rys. 14. Zależności $P-\Delta l$ dla rurek o strukturze $90_2/0_2/90_2$ wykonanych z kompozytu szkło/epoksyd i węgiel/epoksyd



Rys. 15. Zależności $P-\Delta$ dla rurek o strukturze $\pm 15_2/0_2/\pm 15_2$ wykonanych z kompozytu szkło/epoksyd i węgiel/epoksyd

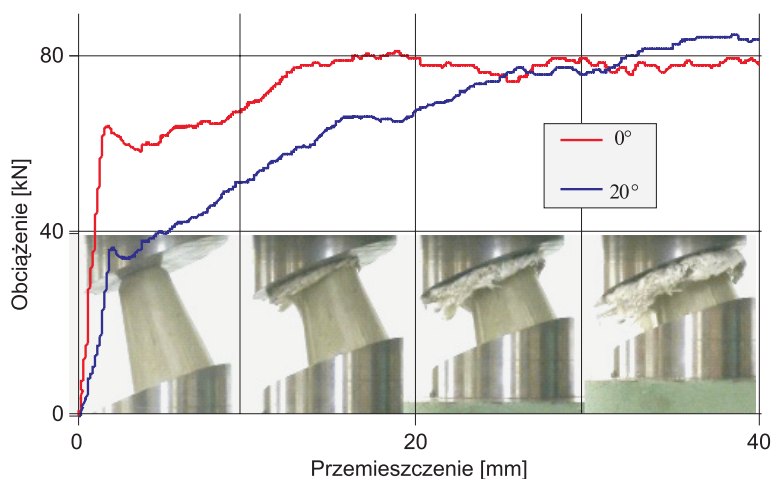
5. Wpływ niektórych czynników na WEA

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.

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.

Orientacja włókien w warstwie wywiera wpływ taki, jaki 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 $(0/90)_T/0/(0/90)_T$.

Przeprowadzono badania **wpływu kąta obciążenia próbki β** (kąt zawarty pomiędzy kierunkiem działania siły niszczącej i osią próbki) na WEA. Próbki w kształcie stożka wykazały nieznaczny wpływ kąta β na mechanizm niszczenia oraz na zdolność absorbowania energii przy kącie obciążenia $\beta = 20^\circ$ (rys. 16), w przeciwieństwie do obciążonych pod kątem $\beta = 20^\circ$ rurek, które przeważnie niszczyły się przez globalne wyboczenie.

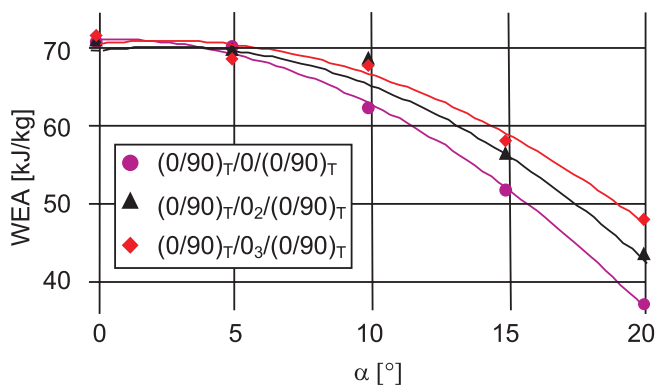


Rys. 16. Porównanie zależności $P-\Delta l$ dla stożków wykonanych z kompozytu szkło/epoksyd ścisanych pod kątem 0° i 20°

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.

Wyniki badań **wpływu połówkowego kąta stożka ściętego** na wartość EA przedstawiono na rysunku 17, 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 spowodowany wzrostem momentu gnącego podczas niszczenia próbek.

Wpływ **indeksu jednolitości siły** (P_{sr}/P_{max}) dla kompozytów S/E wykonanych z maty szklanej dla rurek wynosi około 80%, natomiast próbki wzmocnione ciągłymi włóknami szklanymi około 75%. Kompozyty C/E wzmocnione włóknami ciągłymi, indeks ten wynosi 76%. Mały indeks jest spowodowany dużym P_{max} , który w przypadku kompozytów powoduje mikroniszczenie całej objętości próbki. Następstwem tego jest mniejsza siła progresywnego niszczenia, a za tym i mniejsza WEA.



Rys. 17. Zależność WEA od kąta α dla wybranych struktur kompozytów epoksydowych wzmocnionych włóknami węglowymi

6. Wnioski

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

1. Kompozyty polimerowe ze względu na wysokie właściwości mechaniczne odniesione do masy, mają szerokie zastosowanie w budowie konstrukcji energochłonnych pojazdów i statków powietrznych.
2. Wpływ na wartość pochłanianej energii mają zarówno rodzaj kompozytu, jak i składniki, z których wykonany jest kompozyt — kompozyty epoksydowe wzmocnione włóknami węglowymi wykazują o 20% większą WEA od kompozytów wzmocnionych włóknami szklanymi.
3. Badania próbek o kształcie rurek wykazały dużą powtarzalność wyników w postaci zależności $P_{nisz} - \Delta l$ (rys. 12).
4. Dla przyjętych do badań rodzajów kompozytów i struktur, występuje jednoznaczny wzrost WEA wraz ze wzrostem grubości ścianki, który może być wykorzystany w konstrukcjach wymagających pochłaniania dużej energii uderzenia.
5. Obwodowo zorientowane włókna w próbkach mają główny wpływ na obniżenie liczby pęknięć międzywarstwowych i ich długość, co powoduje wzrost energii absorbowanej. Próbki o strukturze $[(0/90)_T/0_n/(0/90)_T]$, wzmocnione ciągłymi włóknami, wykazały podczas badań największą zdolność pochłaniania energii uderzenia.
6. Wraz ze wzrostem połówkowego kąta stożka, wartość WEA maleje i największą pochłanianą energię otrzymano przy kącie równym zero, czyli dla rurki.
7. Zaletą elementów energochłonnych o kształcie stożków, oprócz tego, że nie wymagają wykonania inicjatorów, w postaci faz na krawędzi, jest tak-

że to, że niszczą się według mechanizmu progresywnego (nie występuje wyboczenie), podczas obciążenia pod kątem $\beta = 20^\circ$ w stosunku do osi stożka.

8. Siła niszcząca i pik siły w badaniu kompozytów znacząco rosną przy wzroście liczby warstw, zawartości włókien w kompozycie, grubości kompozytu i sztywności zginania.
9. Konstrukcje energochłonne wykonane z kompozytów polimerowych mają większą zdolność pochłaniania względnej energii, podczas obciążenia udarowego, aniżeli wykonane z metali i ich stopów.
10. Na wartość pochłaniania energii polimerowego kompozytu, zasadniczy wpływ mają następujące czynniki: rodzaj włókna, rodzaj osnowy, orientacja włókien, postacie wzmocnień, sekwencja ułożenia warstw, zawartość włókien w kompozycie, kształt i geometria próbki.

Artykuł wpłynął do redakcji 11.07.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano we wrześniu 2006 r.

LITERATURA

- [1] J. F. M. WIGGENRAAD, X. ZHANG AND G. A. O. DAVIES, *Impact damage prediction and failure analysis of heavily loaded, blade-stiffened composite wing panels*, Composite Structures, March 1998.
- [2] S. OCHELSKI, *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*, WNT, Warszawa, 2004.
- [3] A. G. MAMALIS, D. E. MANOLAKOS, G. L. VIEGELAHN, *Crashworthy Characteristics of Thin Fibre-Reinforced Composite Frusta Under Axial Collapse*, International Journal of Vehicle Design, vol. 10, no 2, 1989, 165-174.

S. OCHELSKI, P. GOTOWICKI

Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites

Abstract. In the paper, experimental investigations of the energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites were 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.

Keywords polymer composites, absorption energy, experimental testing

Universal Decimal Classification: 678.7.01