



Porównanie zdolności pochłaniania energii kompozytów winyloestrowych z epoksydowymi

STANISŁAW OCHELSKI, PAWEŁ GOTOWICKI

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

Streszczenie. W pracy opisano doświadczalne badania zdolności pochłaniania energii przez elementy energochłonne w kształcie rurek, wykonane z kompozytów o osnowie epoksydowej (E-53) i winyloestrowej (VE-2MM) wzmocnionych włóknami węglowymi i szklanymi. Do badań przyjęto następujące struktury próbek: $(\pm 45_T)_2/0_2/(\pm 45_T)_2$, $[\pm 45_T]_2$, $[(0/90)_T]_2$, $(\pm 45_T)_2/[(0/90)_T]_2/(\pm 45_T)_2$, 0_3 , $[(0/90)_T]_5$. Podano wyniki badań właściwości mechanicznych żywic winyloestrowej i epoksydowej oraz kompozytów ortotropowych o osnowie VE i E wzmocnionych tkaninami węglowymi i szklanymi, z których wykonano próbki. Podano także wyniki badań wpływu rodzaju włókien oraz osnowy na zdolność pochłaniania energii. Badania doświadczalne prowadzono na standardowej maszynie wytrzymałościowej ISTRON 8802, przy prędkości obciążenia (prędkości trawersy maszyny) równej 40 mm/min. Wyniki badań przedstawiono w postaci zależności siły niszczącej od odkształcenia (skrócenia próbki) oraz tabel, w których zawarto właściwości mechaniczne kompozytów. Zależności względnej energii absorbowanej WEA od struktury kompozytu dla elementów z kompozytów o takim samym wzmocnieniu i jednakowej strukturze dla żywic VE i E zestawiono na wykresach. Przedstawione fotografie próbek ilustrują mechanizmy niszczenia badanych elementów energochłonnych. Na podstawie wyników badań próbek w kształcie rurek wykonanych z kompozytów szkło/epoksyd i węgiel/epoksyd oraz szkło/winyloester i węgiel/winyloester można stwierdzić, że największą WEA mają próbki wykonane z kompozytu winyloestrowego wzmocnionego włóknami węglowymi, których warstwy zewnętrzne i wewnętrzne są wykonane z rowingowych tkanin obejmujących naprężenia obwodowe, natomiast warstwy wewnętrzne — z włóknami ułożonymi równoległe do osi próbki, zwiększającymi wytrzymałość na zginanie. Wysoką zdolność pochłaniania energii wykazał kompozyt wzmocniony matą szklaną. Próbki wykonane z kompozytów o osnowie winyloestrowej wykazały WEA wyższą od próbek z żywicą epoksydową, średnio o 13% dla próbek wzmocnionych włóknami szklanymi i o 21% dla próbek wzmocnionych włóknami węglowymi

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, energia absorpcji, badania doświadczalne

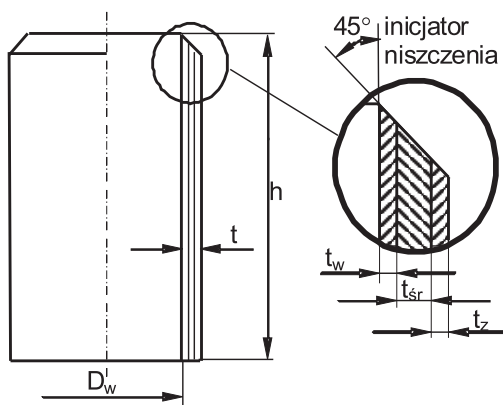
Symbole UKD: 678.5

1. Wstęp

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 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.

2. Przedmiot badań

Przedmiotem badań były próbki wykonane z kompozytów epoksydowych (E-53) oraz winyloestrowych (VE-2MM) 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. Próbki miały kształt rurek o średnicy wewnętrznej $D_w = 39,3 \text{ mm}$ i długości 80 mm (rys. 1). 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. 1. Kształt próbek zastosowanych w badaniach

Do badań przyjęto następujące struktury próbek: $(\pm 45_T)_2/0_2/(\pm 45_T)_2$, $[\pm 45_T]_2$, $[(0/90)_T]_2$, $(\pm 45_T)_2/[(0/90)_T]_2/(\pm 45_T)_2$, 0_3 , $[(0/90)_T]_5$, gdzie warstwa $[0^\circ]$ oznacza kompozyt z ułożonymi równoległe do osi próbek włóknami ciągłymi; $[90^\circ]$ — włókna ułożone prostopadłe do osi próbek; $[(0/90)_T]$ — warstwa wzmocniona tkaniną. Badano też próbki z kompozytów wzmocnionych matą szklaną.

Próbki wykonano metodą kontaktową, poprzez nawijanie kolejnych warstw wzmocnienia na metalowy rdzeń.

3. Metoda badań

Badania doświadczalne były przeprowadzone na standardowej maszynie wytrzymałościowej ISTRON 8802, w temperaturze 20°C i wilgotności powietrza 55%. Badania energochłonności struktur prowadzono przy prędkości obciążenia (prędkości trawersy maszyny) równej 40 mm/min. Zależności siły niszczącej od odkształcenia (skrócenia próbki) otrzymane podczas badań i inne wartości mierzone były zapisywane automatycznie w komputerze.

Właściwości mechaniczne żywic oraz kompozytów określono w statycznych 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 [1]. Wyniki badań przedstawiono w tabelach 1 i 2. Na rysunku 2 pokazano kierunki wzmocnienia kompozytów ortotropowych.

TABELA 1

Właściwości mechaniczne żywic

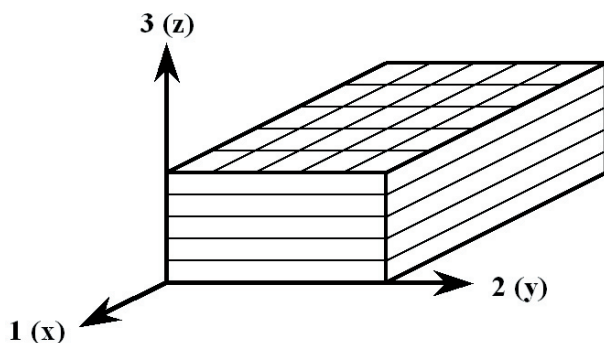
Właściwości mechaniczne	Symbol	VE-2MM	E-53	Jednostka
Wytrzymałość na rozciąganie	R^+	75*	18,9	[MPa]
Moduł sprężystości wzdłużnej — rozciąganie	E^+	3500*	3290	[MPa]
Odształcenia niszczące — rozciąganie	ε^+	0,028*	0,056	[-]
Współczynnik Poissona — rozciąganie	ν^+	-	0,377	[-]
Wytrzymałość na ściskanie	R^-	-	74,4	[MPa]
Moduł sprężystości wzdłużnej — ściskanie	E^-	-	3220	[MPa]
Odształcenia niszczące — ściskanie	ε^-	-	0,052	[-]
Współczynnik Poissona — rozciąganie	ν^-	-	0,375	[-]

*Dane producenta wg ISO 527.

TABELA 2

Właściwości mechaniczne kompozytów ortotropowych

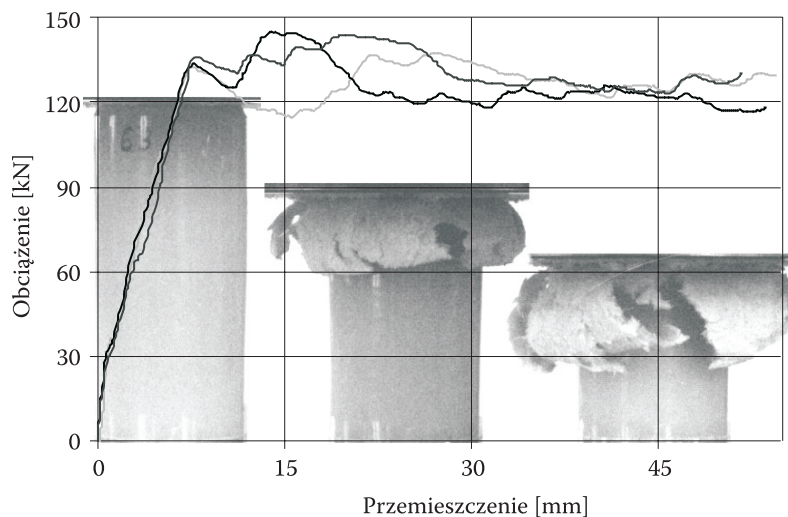
Lp.	Wielkości określone w badaniach		C/E	C/VE	S/E	S/VE	Jedn.
1	E_1^+	Moduł sprężystości wzdłużnej, rozciąganie w kierunku 1	46,4	55,7	19,5	21,1	GPa
2	E_1^-	Moduł sprężystości wzdłużnej, ściskanie w kierunku 1	50,6	66,0	19,3	22,3	GPa
3	ν_{12}	Współczynnik Poissona w płaszczyźnie 1-2	0,14	0,1	0,14	0,11	-
4	G_{12}	Moduł sprężystości poprzecznej w płaszczyźnie 3-1	2,9	4,0	2,4	3,6	GPa
5	R_1^+	Wytrzymałość na rozciąganie w kierunku 1	468,6	611,3	311,7	337,9	MPa
6	R_1^-	Wytrzymałość na ściskanie w kierunku 1	375,2	448,8	306,0	390,2	MPa
7	T_{12}	Wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie 1-2	57,03	64,4	38,4	65,0	MPa
8	ϵ_1^+	Odształcenia niszczące, rozciąganie w kierunku 1	0,010	0,011	0,018	0,019	-
9	ϵ_1^-	Odształcenia niszczące, ściskanie w kierunku 1	0,007	0,007	0,016	0,018	-
10	γ_{12}	Odształcenia niszczące, ścinanie w płaszczyźnie 1-2	0,034	0,039	-	0,048	-



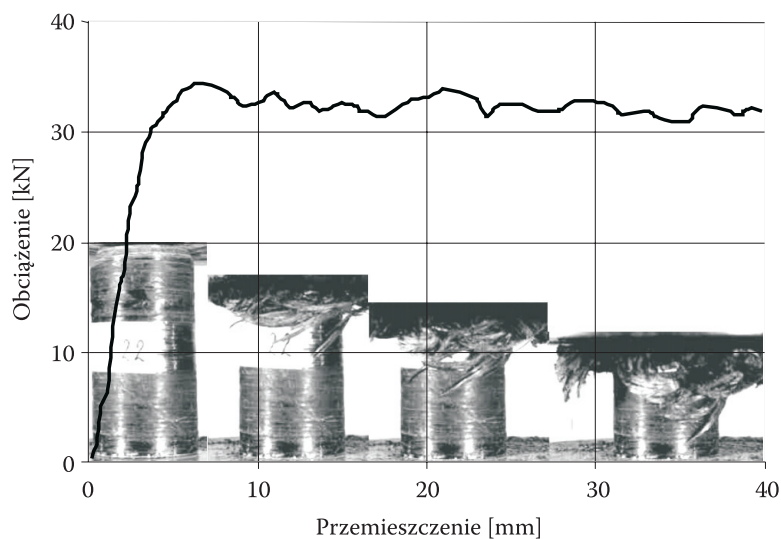
Rys. 2. Kierunki wzmocnienia kompozytów ortotropowych

4. Wyniki badań

Zależności siły niszczącej od przemieszczenia, określone w próbach doświadczalnych próbek wykonanych z kompozytów wzmocnionych włóknami węglowymi i szklanymi oraz fotografie otrzymane w trakcie progresywnego niszczenia próbek przykładowo przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Zależności $P-\Delta l$ dla próbek o jednakowej strukturze, które wykazują mały rozrzut wyników, przedstawiono na rysunku 3.



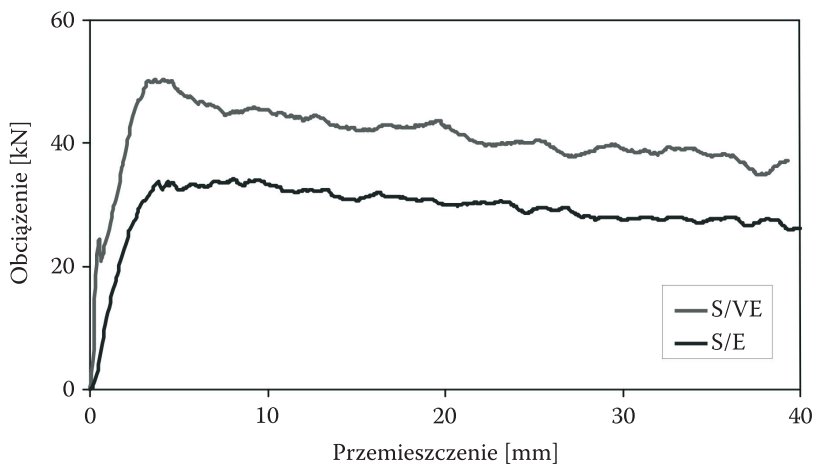
Rys. 3. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia trzech rurek z kompozytu epoksydowego wzmocnionego matą szklaną



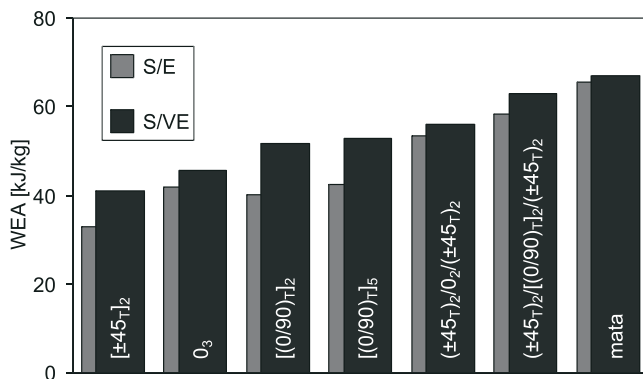
Rys. 4. Zależność siły niszczącej od przemieszczenia kompozytu węgiel/epoksyd o strukturze $90_2/0_2/90_2$

Na rysunku 5 przedstawiono porównanie zależności $P-\Delta l$ otrzymanych podczas badań kompozytów S/E i S/VE.

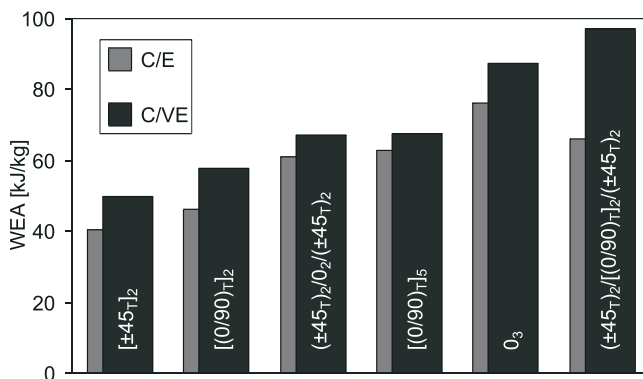
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono zależność WEA od struktury kompozytu oraz rodzaju osnowy.



Rys. 5. Porównanie zależności P- Δ dla kompozytów o strukturze $(\pm 45_T)_2/0_2/(\pm 45_T)_2$



Rys. 6. Zależność WEA od rodzaju oraz struktury kompozytu wzmocnionego włóknami szklanymi



Rys. 7. Zależność WEA od rodzaju oraz struktury kompozytu wzmocnionego włóknami węglowymi

5. Podsumowanie

Na podstawie wyników badań próbek w kształcie rurek wykonanych z kompozytów szkło/epoksyd i węgiel/epoksyd oraz szkło/winyloester i węgiel/winyloester można stwierdzić, że największą WEA mają próbki wykonane z kompozytu winyloestrowego wzmocnionego włóknami węglowymi, których warstwy zewnętrzne i wewnętrzne są wykonane z rowingowych tkanin przejmujących naprężenia obwodowe, natomiast warstwy wewnętrzne — z włóknami ułożonymi równolegle do osi próbki, zwiększającymi wytrzymałość na zginanie. Wysoką zdolność pochłaniania energii wykazał kompozyt wzmocniony matą szklaną.

Próbki wykonane z kompozytów o osnowie winyloestrowej wykazały WEA wyższą od próbek z żywicą epoksydową, średnio o 13% dla próbek wzmocnionych włóknami szklanymi i o 21% dla próbek wzmocnionych włóknami węglowymi.

Na wyższą wartość WEA mają wpływ wyższe właściwości mechaniczne kompozytów winyloestrowych w porównaniu z kompozytami epoksydowymi (tab. 2).

Na podstawie wyników badań możemy wnioskować, że parametrami, które w sposób istotny wpływają na wartość WEA są: rodzaj włókien wzmacniających warstwę, rodzaj osnowy, 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 niszczenia przez zginanie końca próbki. Nachylenie to zależy od stałych materiałowych kompozytu. Kąt nachylenia jest większy dla próbek z kompozytu winyloestrowego, gdyż mają one wyższe właściwości mechaniczne od próbek wykonanych z kompozytu epoksydowego, przy tej samej grubości kompozytu (grubości ścianki próbki) i orientacji włókien.

Właściwości mechaniczne włókien w warstwie, a w szczególności moduły sprężystości i niszczące odkształcenia przy ścinaniu i ściskaniu, decydują o modelu niszczenia przy drugim i następnym piku, na wykresie $P-\Delta l$. Większe moduły sprężystości zwiększają sztywności zginania oraz powodują większą siłę niszczącą i większą WEA (rys. 5). Większa siła niszcząca P_{nisz} próbek z kompozytu winyloestrowego jest również spowodowana większą wiązkością żywicy VE w porównaniu z żywicą epoksydową.

Artykuł wpłynął do redakcji 5.02.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2008 r.

LITERATURA

- [1] S. OCHELSKI, *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*, WNT, Warszawa, 2004.

S. OCHELSKI, P. GOTOWICKI

Comparison of energy absorption capacity of vinylester and epoxy composites

Abstract. Experimental investigations of energy absorption capacity of carbon and glass fiber-reinforced epoxy (E-53) and vinylester (VE-2MM) composite tubes were presented in this paper. Following structures of composites were considered: $(\pm 45_T)_2/0_2/(\pm 45_T)_2$, $[\pm 45_T]_2$, $[(0/90)_T]_2$, $(\pm 45_T)_2/[(0/90)_T]_2/(\pm 45_T)_2$, 0_3 , $[(0/90)_T]_5$. Mechanical properties of vinylester and epoxy resins as well as vinylester and epoxy orthotropic composites reinforced with carbon and glass fabric were researched. In addition, the influence of the sort of fibre and matrix on the energy absorption capacity was investigated. Experimental tests were conducted on universal testing machine INSTRON 8802 at a constant crosshead displacement rate of 40 millimeters per minute. The results of the experimental tests for specimens were depicted in the relation of compressive force-displacement whereas the mechanical properties of the resins and composites were provided in tables. The relations between relative absorbing energy and composite structures for specimens made from composites with the same reinforcement and equal structure for both vinylester and epoxy resin were compared in the form of graphs. Failure mechanisms of tested specimens were shown in photographs. Based on the obtained results for the carbon/epoxy and glass/epoxy as well as for the carbon/vinylester and glass/vinylester composite tubes, it was concluded that specimens made from carbon fiber-reinforced vinylester composite have the highest relative absorbing energy. It was caused by resistance of inner and outer layers of rowing fabric to circumferential stress and by increased bending strength of inner layer of fibers parallel to the specimen axis. The glass mat reinforced composite was also characterized by the high energy absorption capacity. The specimens made from vinylester composites have better relative absorbing energy than those made from epoxy, approximately 13% and 21% greater for glass and carbon reinforced specimens, respectively.

Keywords: polymer composites, energy absorbing, experimental tests

Universal Decimal Classification: 678.5